Campus de São Carlos

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE SOLOS ARTIFICIAIS
ATRAVÉS DA ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO**

SUELLY HELENA DE ARAUJO BARROSO

ORIENTADOR: PROF. DR. GLAUCO TULIO PESSA FABBRI

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

✓
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES - STT

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE SOLOS
ARTIFICIAIS ATRAVÉS DA ADSORÇÃO
DE AZUL DE METILENO**

Suely Helena de Araujo Barroso

Orientador: Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia. Área: Transportes.

São Carlos, maio de 1996

Class.	TESE
Cutt.	0706
Tombo	115/96

Transportes

0745127

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

B277e Barroso, Suelly Helena de Araujo
Estudo do comportamento de solos artificiais
através da adsorção de azul de metileno / Suelly
Helena de Araujo Barroso. -- São Carlos, 1996.
124p.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 1996.
Orientador: Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri

1. Azul de metileno. 2. Solos artificiais.
3. Classificação de solos. I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 15-5-1996
pela Comissão Julgadora:

Prof. Doutor GLAUCO TULIO PESSA FABBRI - Orientador
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor ALEXANDRE BENETTI PARREIRA
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Profa. Dra. LIEDI LÉGI BARIANI BERNUCCI
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)

Presidente da Comissão de Pós-Graduação
Prof. Dr. EDUARDO CLETO PIRES

Coordenador da Área - "Transportes"
Prof.Dr. ALEXANDRE BENETTI PARREIRA

*No tempo de semear, aprenda;
no tempo de colher, ensine;
no entretempo, goze.*

(William Blake)

*Não basta saber,
é preciso aplicar;
não basta querer,
é preciso fazer.*

(Goethe)

*A arte de viver é
uma tática
em que por muito tempo
teremos de ser aprendizes.*

(Chevalier de Boufflers)

DEDICATÓRIA

*A minha mãe, a pessoa que
mais se dedicou a mim e que,
embora distante, sempre esteve
presente nos momentos mais
difíceis.*

AGRADECIMENTOS

A Deus Pai, que sempre me guiou através de suas sábias palavras.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri, pela excelente orientação e principalmente por ter-me ensinado a descobrir o caminho da ciência.

A Marony Costa Martins, a minha melhor amiga, que com a sua experiência de vida muito me ensinou e que não me deixou esmorecer quando eu mais precisei.

A José Thomaz Mendes Filho, pela sua imensa compreensão, carinho e paciência.

Ao Prof. Dr. José Bernardes Felex, pelos seus sábios conselhos e principalmente pela orientação para a vida, meu muito obrigada.

Ao Prof. Dr. Antônio Nunes de Miranda, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, que desde a graduação sempre acreditou em mim e que muito me incentivou a seguir o caminho da pós-graduação.

Aos técnicos do Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes, Gigante, Morasco e Oliveira, não só pela ajuda na execução dos ensaios, mas pela amizade.

A todos os professores do Departamento de Transportes, em especial ao Prof. Dr. Antônio Nelson Rodrigues da Silva e ao Prof. Dr. Manoel Henrique Alba Sória, que sempre foram muito solícitos quando eu precisei.

Ao Prof. Dr. Reinaldo Lorandi, pela boa vontade e ajuda na interpretação dos raios X.

A todos os colegas da pós-graduação, em especial a Alexandre Cagnani, Alexandre Bertini, Attus, Dile, Glauco Pontes, Fábio, Ronaldo e Sandra Fabiana (minha companheira de laboratório).

A todos os funcionários do Departamento de Transportes, em especial à Heloísa e ao Ângelo, pessoas que sempre se preocuparam comigo.

À Mineração Jundu S.A., pelo fornecimento da areia utilizada neste trabalho.

À CAPES pela bolsa concedida, sem a qual a realização desse trabalho não seria possível.

A todos aqueles que, embora não tenham sido mencionados por nome, me ajudaram muitas vezes com pequenas palavras, mesmo sem o saberem.

RESUMO

O trabalho aqui apresentado é resultado de um programa experimental de montagem de solos artificiais. A pesquisa tem como objetivo principal gerar subsídios para uma futura classificação de solos baseada no ensaio de adsorção de azul de metileno, através da análise do comportamento de solos artificiais, resultante de misturas, em que se fazem variar as porcentagens de uma mesma fração grossa e de três tipos de frações finas, obtendo-se um total de 15 amostras de solos compostas em laboratório. Paralelamente, foram testadas as classificações usuais (HRB e USCS) e a MCT, verificando-se a qualidade da previsão das propriedades tecnológicas dos solos fornecida por essas classificações, em função do teor de concentração e do tipo de fração fina das misturas. Os resultados experimentais permitiram conhecer o comportamento de algumas propriedades de interesse à pavimentação, estabelecendo relações entre estas e a quantidade de azul de metileno consumida pelo solo. A partir dessas relações pode-se estimar como variam as propriedades tecnológicas dos solos para diferentes teores e tipos de fração fina.

ABSTRACT

This work results from an experimental program of artificial soils. The main objective of this research is to generate information for a future soil classification based on the methylene blue adsorption test, through analysis of the behaviour of artificial soils, which present variable percentages of a unique gross fraction and three types of fine fraction, resulting into a total of 15 laboratory-built soil samples. Besides, the usual classification systems (HRB and USCS) and the MCT classification system were tested, verifying the quality of prevision of properties furnished by those systems, as a function of the percentage of concentration and of the type of fine fraction of the mixtures. The experimental results allowed to know the behaviour of some properties of interest for paving, by establishing relations between these properties and the quantity of methylene blue consumed by the soil. Based on that relations it is possible to estimate how technological properties of soils vary for different percentages and types of fine fractions.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Gráfico de plasticidade (ASTM, 1990).	14
FIGURA 2.2 - Exemplo da curva granulométrica de um solo, ilustrando a posição dos diâmetros D_{10} , D_{30} e D_{60} , necessários para o cálculo dos coeficientes C_c e C_u .	15
FIGURA 2.3 - Ábaco da classificação MCT (NOGAMI <i>et alii.</i> , 1993).	21
FIGURA 2.4 - Determinação do coeficiente c' para o solo D 20 %.	26
FIGURA 2.5 - Determinação do coeficiente d' para o solo D 20 %.	26
FIGURA 2.6 - Determinação do coeficiente P_i para o solo D 20 %.	28
FIGURA 3.1 - Diagrama granulométrico segundo BOURGUET, BROQUET & ROUSSEAU (1985), sem escala.	36
FIGURA 3.2 - Diagrama de sensibilidade à água, $SE \times \bar{X}$, segundo BOURGUET, BROQUET & ROUSSEAU (1985).	37
FIGURA 3.3 - Variação do índice de nocividade em função da quantidade de montmorilonita e caulinita na mistura (LAUTRIN, 1987).	38
FIGURA 3.4 - Diagrama de nocividade dos solos (LAUTRIN, 1987). Em ordenadas, à direita, está o índice de nocividade (N), e à esquerda, a porcentagem de montmorilonita presente (M(%)).	39

FIGURA 3.5 - Classificação de solos finos segundo MAGNAN & YOUSSEFIAN (1989).	40
FIGURA 3.6 - Ábaco para caracterização do grau de atividade da fração argila dos solos (FABBRI, 1994).	44
FIGURA 3.7 - Equipamentos usados para execução do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha.	47
FIGURA 3.8 - Exemplos do teste de mancha de azul de metileno.	49
FIGURA 4.1 - Localização dos solos artificiais no ábaco proposto por FABBRI (1994).	54
FIGURA 4.2 - Mapa do estado de São Paulo, mostrando as rodovias onde os solos naturais foram coletados.	58
FIGURA 4.3 - Detalhe do trecho de coleta dos solos de Ribeirão Bonito e Descalvado.	58
FIGURA 4.4 - Detalhe do trecho de coleta do solo da rodovia Castelo Branco.	58
FIGURA 5.1 - Massa específica dos sólidos calculada para os solos artificiais.	65
FIGURA 5.2 - Curvas granulométricas para os solos artificiais de Descalvado.	66
FIGURA 5.3 - Curvas granulométricas para os solos artificiais da Castelo Branco.	67
FIGURA 5.4 - Curvas granulométricas para os solos artificiais de Ribeirão Bonito.	67
FIGURA 5.5 - Variação dos valores de limite de liquidez em função do tipo e do teor de fração fina para os solos artificiais.	69

FIGURA 5.6 - Variação da umidade ótima para os solos artificiais em função da energia de compactação e do tipo de fração fina.	71
FIGURA 5.7 - Variação da massa específica aparente seca máxima para os solos artificiais em função da energia de compactação e do tipo de fração fina.	73
FIGURA 5.8 - Variação do mini-CBR - Hm para os solos estudados em função da energia de compactação e do tipo de fração fina.	74
FIGURA 5.9 - Variação do mini-CBR após 24 h de imersão para os solos artificiais em função da energia de compactação e do tipo de fração fina.	76
FIGURA 5.10 - Variação da expansão para os solos artificiais em função da energia de compactação e do tipo de fração fina.	78
FIGURA 5.11 - Variação da contração para os solos artificiais em função da energia de compactação e do tipo de fração fina.	80
FIGURA 5.12 - Variação da RIS para os solos artificiais em função da energia de compactação e do tipo de fração fina.	82
FIGURA 5.13 - Curvas de afundamento para o solo CB 20 %.	86
FIGURA 5.14 - Localização dos solos artificiais na classificação MCT.	87
FIGURA 5.15 - Relação entre a umidade ótima e o valor de azul para os solos estudados.	101
FIGURA 5.16 - Relação entre a massa específica aparente seca máxima e o valor de azul para os solos estudados.	102

FIGURA 5.17 - Relação entre o mini-CBR na umidade de moldagem e o valor de azul para os solos estudados.	104
FIGURA 5.18 - Relação entre o mini-CBR após 24 h de imersão e o valor de azul para os solos estudados.	105
FIGURA 5.19 - Relação entre a expansão e o valor de azul para os solos estudados.	106
FIGURA 5.20 - Relação entre a contração e o valor de azul para os solos estudados.	107
FIGURA 5.21 - Relação entre a relação entre índices de suporte e o valor de azul para os solos estudados.	108
FIGURA 5.22 - Comparação entre a tendência de inclinação das curvas de variação da umidade ótima em função do valor de azul e em função da porcentagem de fração fina do solo.	110

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Classificação de solos da USCS (ASTM,1990).	11
TABELA 2.2 - Classificação de solos da HRB, adaptada da ASTM (1990).	18
TABELA 2.3 - Quadro das propriedades dos solos de cada classe MCT (NOGAMI <i>et alii.</i> , 1993).	22
TABELA 2.4 - Planilha de cálculo do ensaio mini-MCV para o solo D 20 %.	25
TABELA 3.1 - Carta de classificação de solos da RTR (Recommandation pour les Terrassements Routiers) com os valores de Vb (LAN, 1981).	35
TABELA 3.2 - Classificação RTR acrescida do valor de azul, segundo SCHAEFFNER (1989).	41
TABELA 4.1 - Distribuição granulométrica dos solos de Descalvado.	54
TABELA 4.2 - Distribuição granulométrica dos solos da Castelo Branco.	55
TABELA 4.3 - Distribuição granulométrica dos solos de Ribeirão Bonito.	55
TABELA 4.4 - Características das amostras e dos solos de origem.	56
TABELA 4.5 - Distribuição granulométrica da areia selecionada.	59
TABELA 5.1 - Massa específica dos sólidos para as frações grossa e finas.	65

TABELA 5.2 - Resultados dos ensaios de limite de liquidez e de plasticidade para os solos estudados.	68
TABELA 5.3 - Resultados das classificações MCT, HRB e USCS para os solos estudados.	84
TABELA 5.4 - Verificação da concordância entre resultados previstos pela classificação MCT e obtidos em laboratório, para os solos de Descalvado.	90
TABELA 5.5 - Verificação da concordância entre resultados previstos pela classificação MCT e obtidos em laboratório, para os solos da Castelo Branco.	91
TABELA 5.6 - Verificação da concordância entre resultados previstos pela classificação MCT e obtidos em laboratório, para os solos de Ribeirão Bonito.	93
TABELA 5.7 - Proposta de classificação qualitativa das classes de solos como subleito compactado nos sistemas de classificação USCS, HRB e MCT.	95
TABELA 5.8 - Comparação qualitativa da classificação dos solos estudados pelos métodos MCT, HRB e USCS.	96
TABELA 5.9 - Resultados da análise de regressão de algumas propriedades em função do valor de azul, para as energias de compactação normal e intermediária.	100

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações Iniciais	1
1.2. O Problema	3
1.3. Objetivos	3
1.4. O Método	4
1.5. Estrutura do Trabalho	4
 CAPÍTULO 2: AS CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS DE SOLOS	 6
2.1. Considerações Iniciais	6
2.2. Histórico das Principais Classificações Tradicionais de Solos	7
2.3. O Sistema Unificado de Classificação de Solos	10
2.4. A Classificação HRB	16
2.5. O Método MCT para Solos Tropicais	19
2.5.1. Generalidades	19
2.5.2. A Classificação MCT	20
2.5.3. O Ensaio Mini-MCV	23
2.5.4. O Ensaio de Perda de Massa por Imersão	27

2.6. Considerações Finais	29
---------------------------	----

CAPÍTULO 3: A UTILIZAÇÃO DO ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO NA CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS	30
--	-----------

3.1. Considerações Iniciais	30
-----------------------------	----

3.2. Fundamentos do Método de Adsorção de Azul de Metileno	31
--	----

3.3. Principais Estudos com Solos Baseados no Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno	33
--	----

3.3.1. Estudos Realizados no Exterior	33
---------------------------------------	----

3.3.2. Estudos Realizados no Brasil	42
-------------------------------------	----

3.4. Execução do Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno pelo Método da Mancha	45
---	----

3.4.1. O Conceito de Valor de Azul de Metileno de um Solo	45
---	----

3.4.2. Equipamentos Necessários	46
---------------------------------	----

3.4.3. Procedimento de Execução	48
---------------------------------	----

3.5. Considerações Finais	49
---------------------------	----

CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS	51
--	-----------

4.1. Considerações Iniciais	51
-----------------------------	----

4.2. Materiais Empregados	52
4.2.1. Generalidades	52
4.2.2. Fração Fina	56
4.2.3. Fração Grossa	57
4.3. Métodos Usados na Execução dos Ensaios	59
4.3.1. Introdução	59
4.3.2. Massa Específica dos Sólidos	60
4.3.3. Granulometria	60
4.3.3.1. Granulometria por Peneiramento	60
4.3.3.2. Granulometria por Sedimentação	60
4.3.4. Limite de Liquidez	61
4.3.5. Limite de Plasticidade	61
4.3.6. Mini-CBR, Expansão e Contração	61
4.3.7. Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão	62
4.3.8. Adsorção de Azul de Metileno	62
4.3.9. Difractometria de Raios X pelo Método do Pó	62
4.3.10. Microscopia Eletrônica de Varredura	63
4.4. Considerações Finais	63

CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	64
5.1. Introdução	64
5.2. Massa Específica dos Sólidos	64
5.3. Granulometria	66
5.4. Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade	68
5.5. Mini-CBR, Expansão e Contração	70
5.5.1. Umidade Ótima	71
5.5.2. Massa Específica Aparente Seca Máxima	72
5.5.3. Mini-CBR na Umidade de Moldagem	73
5.5.4. Mini-CBR Após 24 h de Imersão	75
5.5.5. Expansão	77
5.5.6. Contração	79
5.5.7. Relação entre Índices de Suporte	81
5.6. Classificações MCT, HRB e USCS	83
5.6.1. Comentários Sobre a Classificação dos Solos na Carta MCT	84
5.6.1.1. Dificuldades Encontradas	84
5.6.1.2. Variação das Classes de Solos na Carta MCT	86
5.6.1.3. Comparação entre a Previsão de Propriedades dos Solos pelo Ábaco da MCT e os Resultados Obtidos em Laboratório	88

5.6.2. Comparação entre as Classes dos Solos Obtidas pelos Sistemas de Classificação HRB, USCS e MCT	93
5.7. Ensaio de Adsorção de Azul de Metileno	98
5.7.1. Considerações Iniciais	98
5.7.2. Umidade Ótima $\times$ Valor de Azul	101
5.7.3. Massa Específica Aparente Seca Máxima $\times$ Valor de Azul	102
5.7.4. Mini-CBR na Umidade de Moldagem $\times$ Valor de Azul	103
5.7.5. Mini-CBR Após 24 h de Imersão $\times$ Valor de Azul	104
5.7.6. Expansão $\times$ Valor de Azul	105
5.7.7. Contração $\times$ Valor de Azul	107
5.7.8. Relação entre Índices de Suporte $\times$ Valor de Azul	108
5.7.9. Considerações Finais	109
5.8. Difractometria de Raios X pelo Método do Pó	111
5.9. Microscopia Eletrônica de Varredura	111
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES	113
6.1. Introdução	113
6.2. Principais Conclusões	113
6.2.1. Quanto à Classificação MCT	113

6.2.2. Quanto à Variação das Propriedades Tecnológicas dos Solos em Função da Variação do Teor e do Tipo de Fração Fina	114
6.2.3 Quanto à Relação das Propriedades Tecnológicas dos Solos em Função do Valor de Azul	116
6.3. Sugestão para Avaliação Preliminar das Propriedades Tecnológicas dos Solos	117
6.4. Desenvolvimentos Futuros	117

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
-----------------------------------	------------

ANEXO I: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MINI-CBR, EXPANSÃO E CONTRAÇÃO, NA ENERGIA NORMAL, PARA OS SOLOS COMPOSTOS DE DESCALVADO, RIBEIRÃO BONITO E CASTELO BRANCO.

ANEXO II: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MINI-CBR, EXPANSÃO E CONTRAÇÃO, NA ENERGIA INTERMEDIÁRIA, PARA OS SOLOS COMPOSTOS DE DESCALVADO, RIBEIRÃO BONITO E CASTELO BRANCO.

ANEXO III: DIFRATOGRAMAS DE RAIOS X

ANEXO IV: FOTOGRAFIAS NO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A importância do estudo dos solos tropicais decorre da magnitude de sua distribuição geográfica. O Brasil é um país que apresenta consideráveis porções de seu território em zona de clima tropical. Há uma constante necessidade de estudos em busca de métodos mais apropriados para avaliar a adequação dos tipos de solos quanto ao seu emprego em pavimentação.

As classificações geotécnicas mais utilizadas nos meios rodoviários ainda são a HRB (Highway Research Board) e a USCS (Unified Soil Classification System), ditas tradicionais, nas quais a granulometria e os limites de Atterberg são determinantes para se classificarem os diversos tipos de solos e a eles inferirem propriedades de interesse na execução de obras. Estas classificações possuem sérias limitações quando aplicadas aos solos tropicais, já que foram elaboradas em países de clima essencialmente temperado, onde as condições ambientais são consideravelmente distintas, afetando o processo de formação dos solos.

As classificações HRB e USCS podem classificar solos pedogeneticamente diferentes (como é o caso dos solos laterítico e saprolítico) como sendo pertencentes à mesma classe, embora apresentem propriedades geotécnicas bem distintas, principalmente quando compactados. Assim

pode ser conferido aos solos de comportamento laterítico um desempenho inferior ao verificado na prática.

Estudos efetuados por NOGAMI & VILLIBOR (1980) identificam a existência de duas grandes classes de solos, em função de seu comportamento quando compactados, separando-os em lateríticos e não lateríticos.

NOGAMI & VILLIBOR (1980, 1981, 1985) desenvolveram o método MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), que pode ser considerado um marco no cenário da pavimentação. Hoje, com o uso dessa ferramenta, é possível identificar as principais diferenças entre os vários tipos de solos tropicais e prever seu comportamento como camada integrante de um pavimento.

O método MCT é constituído por um conjunto de ensaios realizados em corpos de prova com dimensões reduzidas e por uma classificação geotécnica de solos, chamada MCT. Seu uso despertou na comunidade científica o interesse em se proporem outros procedimentos que também caracterizassem os solos tropicais. O método MCT é, sem dúvida, inovador, mas não deixa de ser seriamente discutido e passível de críticas.

Segundo FABBRI (1994), a classificação MCT apresenta alguns problemas em razão de sua complexidade, além de restrições quanto ao seu uso, devidas aos processos de ensaio. Esse autor testou a possibilidade da utilização do ensaio de adsorção de azul de metileno para caracterizar solos tropicais. Comprovou que este ensaio é, no mínimo, promissor para fins de caracterização e classificação de solos.

O ensaio de azul de metileno, desenvolvido por LAN (1977), é bastante empregado no exterior, principalmente na França, onde o Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) vem realizando inúmeras pesquisas que comprovam sua aplicação nas classificações geotécnicas.

Para LAUTRIN (1987), o ensaio de azul é um procedimento rápido para a identificação de argilo-minerais e é um complemento indispensável ao processo de reconhecimento dos solos.

Apesar de esse ensaio ter sido pouco testado no Brasil, vem mostrando ser uma ferramenta poderosa quando aplicado aos solos tropicais, principalmente após as pesquisas realizadas por CASANOVA (1986), FABBRI & SÓRIA (1991), PEJON (1992) e FABBRI (1994).

CASANOVA (1986) refere-se ao método como extremamente simples e dotado de uma série de vantagens, entre as quais rapidez e reprodutibilidade, dispensando instrumentos sofisticados e onerosos, além de permitir a determinação simultânea da capacidade de troca catiônica e da superfície específica em uma única operação.

1.2. O PROBLEMA

De acordo com as considerações acima expostas, é possível enunciar o problema que estimulou o desenvolvimento do presente trabalho: não existe no Brasil um método simples, rápido e eficaz capaz de caracterizar os solos tropicais para uso como material de construção civil em obras rodoviárias.

1.3. OBJETIVOS

Esta dissertação tem como objetivo principal gerar subsídios para uma futura classificação de solos baseada no ensaio de adsorção de azul de metileno. Paralelamente, busca-se conhecer a variação das propriedades tecnológicas dos solos em função do tipo e do teor de fração fina, e também testar as classificações HRB, USCS e MCT do ponto de vista de previsão de propriedades.

1.4.O MÉTODO

Objetivando gerar subsídios para uma classificação de solos baseada no ensaio de adsorção de azul de metileno, estudou-se a variação das propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos em função do comportamento resultante da mistura de materiais diferentes. Isto foi conseguido através da montagem de 15 solos artificiais, obtidos a partir da mistura de uma mesma fração grossa (retida na peneira de abertura nominal de 0,074 mm) com três tipos de frações finas (passadas na peneira de abertura nominal de 0,074 mm), cada uma com um grau de atividade (FABBRI, 1994) e teores diferentes de concentração. Paralelamente, testaram-se as classificações usuais (HRB e USCS) e a MCT, para efeito de análise e comparação dos resultados, verificando-se a qualidade da previsão do comportamento dos solos fornecida por essas classificações e como variaram as classes das 15 amostras de solos em função do teor e do tipo da fração fina presente.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho consta de seis capítulos e de quatro anexos.

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão sobre as classificações geotécnicas mais usadas nos meios técnicos. No capítulo 3 são discutidos os fundamentos do ensaio de adsorção de azul de metileno e os principais estudos realizados utilizando-se esse método. No capítulo 4 são descritos os materiais e os métodos empregados para execução do trabalho aqui proposto. No capítulo 5 expõem-se e analisam-se os resultados obtidos durante a fase experimental. No capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões resultantes da realização dessa pesquisa, bem como sugestões para estudos futuros e para aplicação prática dos resultados apresentados.

No anexo I apresentam-se os resultados dos ensaios de mini-CBR, expansão e contração, executados na energia de compactação normal. No anexo II mostram-se os resultados desses mesmos ensaios quando executados na energia de compactação intermediária. No anexo III figuram os difratogramas de raios X e no anexo IV as fotografias obtidas no microscópio eletrônico de varredura.

CAPÍTULO 2

AS CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS DE SOLOS

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Na engenharia civil, a avaliação das propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos é uma das primeiras atividades a serem realizadas para fins de elaboração de projeto e do uso do solo como material de construção em rodovias. Para tanto, é necessário que se conheçam, preliminarmente, as propriedades geotécnicas dos solos, valendo-se de uma classificação que permita prever o comportamento e o potencial de uso dos mesmos quando empregados em obras viárias.

Para que uma classificação de solos seja apropriada para engenharia, ela deve gozar de duas características principais, conforme citado em SÓRIA (1985): (1) permitir que, quando se tem um grande número de amostras, se ensaiem apenas alguns poucos solos que representem o universo das amostras em questão; (2) permitir que, tendo-se a classe do solo, tenha-se uma estimativa do seu comportamento no campo ou na obra; isto além de facilitar a comunicação entre técnicos que conheçam a mesma classificação.

Neste capítulo, procura-se mostrar um breve histórico das principais classificações de solos, dando-se maior ênfase às classificações tradicionais USCS (Unified Soil Classification System) e HRB (Highway

Research Board), e à classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) para solos tropicais.

2.2. HISTÓRICO DAS PRINCIPAIS CLASSIFICAÇÕES TRADICIONAIS DE SOLOS

CASAGRANDE (1947) apresentou um relato das principais classificações de solos utilizadas em engenharia civil. Esse artigo serviu de base para as citações, aqui apresentadas, com data anterior a 1945.

Em 1908, A. Atterberg propôs uma classificação de solos, utilizando apenas o critério de textura, a partir de estudos voltados para utilização de solos em agricultura.

A classificação do "United States Bureau of Public Roads", chamada comumente PR-29, foi elaborada no período de 1927 a 1929, a partir da observação de solos finos. É uma classificação de subleitos, baseada na análise granulométrica. Após o ano de 1930, essa classificação foi complementada com o uso dos chamados limites de Atterberg. Os solos são classificados utilizando-se basicamente critérios de granulometria, plasticidade e características de contração.

Em 1939, surgiu a classificação do "Texas Highway Department". Essa classificação agrupa os solos em dez classes distintas e baseia-se nas características de granulometria e plasticidade do solo.

Com o objetivo de classificar solos para subleitos de aeroportos, surgiu em 1944 o "Civil Aeronautics Administration Soil Classification System". Essa classificação estabelece dez grupos de solos, que são classificados de acordo com as características de plasticidade, resultados de análises

mecânicas e características de expansão, sendo estas duas últimas determinadas em ensaios de CBR.

MIDDLEBROOKS¹ *apud* SÓRIA (1985) publicou, em 1945, a "Soil Classification for Airfields", mais conhecida como sistema de classificação AC, que foi inicialmente desenvolvida por Casagrande, entre 1942 e 1944 (CASAGRANDE, 1947).

STEELE (1945) publicou, nos anais da HRB, a classificação que ficou conhecida como HRB. Os solos são agrupados através dos ensaios de granulometria e limites de Atterberg, e apresentam-se considerações sobre a adequação de materiais para diferentes usos em camadas de pavimentos.

Em 1947, Casagrande publicou finalmente a classificação USCS cujo estudo inicial foi proposto em 1943, na reunião da "American Society of Civil Engineers". Esse autor apresentou um novo agrupamento de solos desenvolvido para atender os projetos dos aeroportos militares (CASAGRANDE, 1947).

Em 1950, foi publicada na Inglaterra a "British Soil Classification", classificação essa baseada na elaborada por Casagrande e indicada para utilização em aeroportos e rodovias (DUMBLETON, 1981).

No ano de 1951 aconteceu em Baltimore uma reunião da "American Society for Testing and Materials" (ASTM), onde se discutiram as classificações de solos existentes, confrontando-as. Nessa reunião, debatia-se que a classificação HRB (Highway Research Board) é uma revisão da PR-29, com algumas alterações. A classificação "Unified Soil Classification System" (USCS) é uma adaptação da AC, desenvolvida por Casagrande (MORA, 1993).

¹MIDDLEBROOKS, T. A. *Classification of materials for subgrade for airfields and granular type roads. Highway Research Board, Proceedings, 1945, p. 348-386* *apud* SÓRIA, M. H. A. *Reflexões lógicas sobre classificações de solos. São Carlos, 1985 (Tese de Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. p. 68.*

SCHON (1965) publicou na França um sistema de classificação com base na USCS, compreendendo 15 tipos de solos, divididos em três grandes grupos: solos de graduação grossa (com 8 tipos), solos de graduação fina (com 6 tipos) e solos turfosos (com um tipo). O sistema é consideravelmente simples, incluindo um procedimento rápido para classificação de solos finos.

No ano de 1968, na Inglaterra, foi feita uma revisão no sistema de classificação USCS, o qual foi republicado no TRRL (Transport Road Research Laboratory), sendo posteriormente modificado em 1973 (DUMBLETON, 1981).

Há ainda outras classificações norte-americanas, como a classificação de Yoder, de 1975, que acrescentou à original de Casagrande informações a respeito dos valores de módulo de reação do subleito; seu trabalho serviu de subsídio a uma tabela de classificação publicada pela "Federal Aviation Administration" (FAA) (SÓRIA, 1985). Conforme exposto em MORA (1993), também semelhantes à classificação de Casagrande são o sistema de classificação da "American Railway Engineering Association" e a do "Earth Manual", que é publicação do "U.S. Bureau of Reclamation".

Uma análise do acima exposto permite concluir que tais classificações de solos são adaptações da inicialmente proposta em 1947 por A. Casagrande.

A aplicação das classificações tradicionais é bastante restrita em países de clima tropical. Em consequência das características particulares das regiões tropicais e das peculiaridades dos solos formados sob essas condições climáticas, a maioria das classificações de solos são inadequadas, visto que estas foram desenvolvidas essencialmente em países de clima temperado, sob condições climáticas consideravelmente diferentes das encontradas no Brasil.

Em razão da inexistência de uma classificação para solos tropicais, surgiram no Brasil novas propostas de caracterização de solos, como as

elaboradas por MEDINA & PREUSSLER (1980), que apresentaram sua "Classificação Resiliente", permitindo obter o chamado módulo resiliente a partir de índices classificatórios tradicionais, a de NOGAMI & VILLIBOR (1981), que propuseram uma classificação de solos para finalidades rodoviárias (explicada com detalhes no item 2.5), a de VERTAMATTI (1988) que, estudando solos da região amazônica, propôs a inclusão de uma faixa no ábaco de classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), adicionando-lhe três novas classes de solos, e a de FABBRI (1994), que propôs a caracterização da fração fina dos solos tropicais a partir da utilização do ensaio de azul de metileno. Destacam-se também alguns trabalhos como o de SÓRIA (1985), que discutiu as bases lógicas das classificações de solos.

2.3. O SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS

O Sistema Unificado de Classificação de Solos, muito conhecido por suas iniciais em língua inglesa — USCS (Unified Soil Classification System), surgiu como uma evolução do "Airfield Classification System".

Em sua versão mais recente (ASTM, 1990), a USCS apresenta uma tabela de classificação onde identificam-se três principais divisões de solos: solos de granulometria grossa, solos de granulometria fina e solos altamente orgânicos. Estas três divisões são ainda subdivididas em 15 grupos básicos de solos, como ilustrado na tabela 2.1 .

TABELA 2.1 - Classificação de solos da USCS (ASTM, 1990).

Critérios para Estabelecer Símbolos de Grupos e Nomes de Grupos Usando Ensaio de Laboratório ^A				Classificação do Solo	
				Grupo	Nome do Grupo ^B
Solos de granulometria grossa mais de 50 % do solo retido na peneira n ° 200	Pedregulhos mais que 50 % de fração grossa retida na peneira n ° 4	Pedregulhos Limpos	$Cu \geq 4$ e $1 \leq Cc \leq 3^E$	GW	Pedregulho bem graduado ^F
		Menos de 5 % de finos ^C	$Cu < 4$ e/ou $1 > Cc > 3^E$	GP	Pedregulho mal graduado ^F
		Pedregulhos com finos	Finos classificam-se como ML ou MH	GM	Pedregulho siltoso ^{F, G, H}
		Mais de 12 % de finos ^C	Finos classificam-se como CL ou CH	GC	Pedregulho argiloso ^{F, G, H}
	Areias 50 % ou mais da fração grossa passa na peneira n ° 4	Areias Limpas	$Cu \geq 6$ e $1 \leq Cc \leq 3^E$	SW	Areia bem graduada
		Menos de 5 % de finos ^D	$Cu < 6$ e/ou $1 > Cc > 3^E$	SP	Areia mal graduado
		Areias com finos	Finos classificam-se como ML ou MH	SM	Areia siltosa ^{G, H, I}
		Mais de 12 % de finos ^D	Finos classificam-se como CL ou CH	SC	Areia argilosa ^{G, H, I}
Solos de granulometria fina 50 % do solo ou mais passa na peneira n ° 200	Siltes e argilas	Inorgânicos	$IP > 7$ e sobre ou acima da linha "A" ^J	CL	Argila pouco plástica ^{K, L, M}
	Limite de liquidez menor que 50		$IP < 4$ e abaixo da linha "A" ^J	ML	Silte
		Orgânicos	$\frac{LL - \text{seco o em estufa}}{LL - \text{não seco o em estufa}} < 0,75$	OL	Argila orgânica ^{K, L, M} Silte orgânico ^{K, L, M, O}
	Limite de liquidez maior ou igual a 50	Inorgânicos	IP sobre ou acima da linha "A"	CH	Argila muito plástica ^{K, L, M}
			IP abaixo da linha "A"	MH	Silte elástico ^{K, L, M}
		Orgânicos	$\frac{LL - \text{seco o em estufa}}{LL - \text{não seco o em estufa}} < 0,75$	OH	Argila orgânica ^{K, L, MP} Silte orgânico ^{K, L, MQ}
			Solos altamente orgânicos		

- ^A Baseado no material passando na peneira de 3 polegadas (75 mm).
- ^B Se amostra de campo contém rachões, adicionar "com rachões" ao nome do grupo.
- ^C Pedregulhos com de 5 a 12 % de finos requerem símbolos duplos:
 GW-GM pedregulho bem graduado com silte
 GW-GC pedregulho bem graduado com argila
 GP-GM pedregulho de graduação pobre com silte
 GP-GC pedregulho de graduação pobre com argila
- ^D Areias com 5 a 12 % de finos requerem símbolos duplos:
 SW-SM pedregulho bem graduado com silte
 SW-SC pedregulho bem graduado com argila
 SP-SM pedregulho de graduação pobre com silte
 SP-SC pedregulho de graduação pobre com argila
- ^E $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$
- ^F Se o solo contém 15 % ou mais de areia, adicionar "com areia" ao nome do grupo.
- ^G Se os finos se classificam como CL ou ML, usar símbolos duplos GC-GM, ou SC-SM.
- ^H Se os finos são orgânicos, adicionar "com finos orgânicos" ao nome do grupo.
- ^I Se o solo contém 15 % ou mais de pedregulho, adicionar "com pedregulho" ao nome do grupo.
- ^J Se os limites de Atterberg recaem sobre a área hachurada, o solo é uma areia siltosa, CL-ML.
- ^K Se os solos contém de 15 a 29 % de material retido na peneira n.º 200, adicionar "com areia" ou "com pedregulho", aquele que for predominante.
- ^L Se os solos contém mais de 30 % de material retido na peneira n.º 200, predominantemente arenoso, adicionar "arenoso" ao nome do grupo.
- ^M Se os solos contém mais de 30 % de material retido na peneira n.º 200, predominantemente arenoso, adicionar "pedregulhoso" ao nome do grupo.
- ^N $IP \geq 4$ e recai sobre ou acima da linha "A".
- ^O $IP < 4$ e recai abaixo da linha "A".
- ^P IP recai sobre ou acima da linha "A".
- ^Q IP recai abaixo da linha "A".

Nesse sistema, os parâmetros determinantes para classificação são a granulometria e os limites de Atterberg. Os solos são classificados quanto ao tamanho das partículas em pedregulho, areia, silte ou argila, tendo-se ainda que:

- a) os pedregulhos e as areias subdividem-se em bem graduados, de graduação média, mal graduados, siltosos ou argilosos;
- b) os siltes subdividem-se em siltes de baixa plasticidade, orgânicos de baixa plasticidade, orgânicos de alta plasticidade ou elásticos;
- c) as argilas subdividem-se em pouco plásticas, orgânicas e de alta plasticidade .

O processo de classificação consiste primeiramente em determinar se o solo é orgânico, de granulometria grossa ou fina; em seguida, com os dados de granulometria e dos limites de Atterberg, define-se a que grupo pertence, consultando-se a tabela 2.1.

Para a classificação da fração fina, utilizam-se os valores dos limites de Atterberg e o chamado gráfico de plasticidade, definindo-se assim o grupo a que pertence o solo analisado.

O gráfico de plasticidade apresenta, em abscissas, o valor do limite de liquidez, e em ordenadas o valor do índice de plasticidade, conforme mostra a figura 2.1. Observe-se que este gráfico é dividido em regiões, destacando-se as linhas A, B e U, cujas equações são as seguintes:

Linha "A":	$\begin{cases} IP = 0,73 (LL - 20) & \text{para } LL > 25,5 \% \\ IP = 4 & \text{para } 4 \% \leq LL \leq 25,5 \% \end{cases}$
Linha "B":	$LL = 50 \quad \text{para } IP < 50 \%$
Linha "U":	$\begin{cases} IP = 0,9 (LL - 8) & \text{para } LL > 16 \% \\ LL = 16 & \text{para } IP < 7 \% \end{cases}$

A linha "A" separa, para o universo dos solos inorgânicos e a menos da região onde os solos são classificados com letras dobradas (CL - ML), os siltes das argilas, que são representados respectivamente abaixo e acima da mesma; a linha "B" separa os solos de alta compressibilidade, situados à sua direita, dos de baixa compressibilidade, localizados à sua esquerda (BUENO & VILAR, 1984); já a linha "U", determinada empiricamente para ser o limite superior aproximado para solos naturais, é uma boa verificação quanto à existência de dados errados, e quaisquer resultados de ensaios que recaiam acima ou à esquerda dessa linha devem ser verificados (ASTM, 1990).

FIGURA 2.1 - Gráfico de plasticidade (ASTM, 1990).

Para classificação da fração grossa, calculam-se os coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c), respectivamente definidos por:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.1)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (2.2)$$

onde:

D_{10} = diâmetro correspondente a 10 % do material que passa, tomado na curva granulométrica;

D_{30} = diâmetro correspondente a 30 % do material que passa, tomado na curva granulométrica;

D_{60} = diâmetro correspondente a 60 % do material que passa, tomado na curva granulométrica.

FIGURA 2.2 - Exemplo da curva granulométrica de um solo, ilustrando a posição dos diâmetros D_{10} , D_{30} e D_{60} , necessários para o cálculo dos coeficientes C_c e C_u .

2.4. A CLASSIFICAÇÃO HRB

A classificação do HRB (Highway Research Board), originária do "Bureau of Public Roads" (BPR) de 1929, é a mais empregada na caracterização de solos para uso em estradas. Nesta classificação, os solos são divididos em grupos e subgrupos, de acordo com os critérios baseados em granulometria e plasticidade.

No sistema HRB os solos são divididos em materiais granulares e materiais siltsos e argilosos, conforme a quantidade de material que passe na peneira de nº 200, seja menor ou maior a 35 %, respectivamente. Os solos granulares compreendem os grupos A-1 (subdividido em A-1-a e A-1-b), A-2 (subdividido em A-2-4 , A-2-5 , A-2-6 e A-2-7), e A-3. Os solos siltsos e argilosos pertencem aos grupos A-4, A-5, A-6 e A-7 (subdividido em A-7-5 e A-7-6), como mostra a tabela 2.2.

O procedimento de classificação é bastante simples, bastando executar ensaios de granulometria por peneiramento e limites de liquidez e de plasticidade, devendo-se determinar também o chamado índice de grupo (IG), que é um número inteiro variando de 0 a 20 e que, de acordo com essa classificação, define a capacidade de suporte do terreno de fundação de um pavimento. Quanto menor for o IG melhor será o solo, de modo que o valor 0 indica um material excelente e o valor 20 um péssimo material para subleito.

O IG é dado então por:

$$IG = 0,2 a + 0,005 ac + 0,01 bd \quad (2.3)$$

onde:

a = porcentagem do material que passa na peneira n.º 200, menos 35; se essa porcentagem for maior que 75, adota-se $a = 40$ e, se é menor que 35, adota-se $a = 0$;

b = porcentagem do material que passa na peneira n.º 200, menos 15; se essa porcentagem for maior que 55, adota-se $b = 40$ e, se é menor que 35, adota-se $b = 0$;

c = valor do limite de liquidez, menos 40; se o limite de liquidez for maior que 60 %, adota-se $c = 20$ e, se é menor que 40 %, adota-se $c = 0$;

d = valor do índice de plasticidade, menos 10; se o índice de plasticidade for maior que 30 %, adota-se $d = 20$ e, se é menor que 30 %, adota-se $d = 0$;

De posse dos dados de granulometria, limites de liquidez, índice de plasticidade, consulta-se a tabela 2.2, sempre da esquerda para direita, e obtém-se então o grupo a que pertence o solo ensaiado. Caso o solo se enquadre no grupo A-7, deve-se verificar se ele pertence ao subgrupo A-7-5 ou A-7-6. Se IP for menor ou igual a LL menos 30, pertence ao subgrupo A-7-5; caso o IP seja maior que LL menos 30, deverá ser classificado como A-7-6.

TABELA 2.2 - Classificação de solos da HRB, adaptada de ASTM (1990).

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES (35 % ou menos passando na peneira n.º 200)							MATERIAIS SILTOSOS E ARGILOSOS (mais de 35% passando na peneira de nº200)			
GRUPOS	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
Porcentagem que passa nas peneiras de abertura nominal igual a											
2,00 mm	50 máx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,42 mm	30 máx	50 máx	51 mín	-	-	-	-	-	-	-	-
0,074 mm	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Características da fração que passa na peneira de abertura nominal igual a 0,42 mm											
Limite de liquidez (%)	-	-	-	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de Plasticidade (%)	6 máx	6 máx	NP	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Índice de Grupo (IG)	0	0	0	0	0	< 4	< 4	< 8	< 12	< 16	< 20
Materiais predominantes	Pedra britada, pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia siltosa ou argilosa				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Regular a mau			

2.5. O MÉTODO MCT PARA SOLOS TROPICAIS

2.5.1. GENERALIDADES

De acordo com o que foi exposto nos itens anteriores, pode-se observar que as classificações estrangeiras, como a HRB e USCS, estão baseadas na determinação do limite de liquidez, do índice de plasticidade e granulometria por peneiramento.

Uma das limitações desses métodos deve-se a eles não levarem em consideração as diferenças entre os vários tipos de solos que ocorrem nas regiões tropicais, como é o caso dos solos lateríticos e dos solos saprolíticos, que podem ser classificados, de acordo com os sistemas de classificação tradicionais, como sendo pertencentes a uma mesma classe.

NOGAMI & VILLIBOR (1981) propuseram no Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais "Uma Nova Classificação de Solos para Finalidades Rodoviárias" denominada MCT (Miniatura, Compactado e Tropical). São propostas duas classes de solos, segundo sua origem pedogenética, e sete grupos, e os ensaios são realizados em corpos de prova de dimensões reduzidas (50 mm de diâmetro nominal).

NOGAMI & VILLIBOR (1985) desenvolveram também, o ensaio S-MCV (S de subminiatura) que é semelhante ao ensaio mini-MCV (descrito com maiores detalhes no item 2.5.3). O ensaio S-MCV é realizado em corpos de prova de 26 mm de diâmetro e permite, mediante o estabelecimento de algumas correlações empíricas, classificar os solos, utilizando-se uma quantidade bem menor de amostra (menos de 0,5 kg).

O desenvolvimento do método MCT contribuiu para a solução de uma série de problemas relacionados ao emprego de solos em obras de engenharia,

sobretudo em rodovias, uma vez que se baseia nas considerações locais do clima e em materiais que predominam em regiões tropicais.

Para se classificar um solo pela MCT, utiliza-se o ensaio mini-MCV, que foi adaptado do ensaio do MCV ("Moisture Condition Value") de Parsons, por SÓRIA & FABBRI (1980), e o ensaio de perda de massa por imersão, proposto por NOGAMI & VILLIBOR (1981).

2.5.2. A CLASSIFICAÇÃO MCT

A classificação geotécnica MCT agrupa os solos tropicais, de acordo com o seu comportamento no estado compactado, em duas classes principais: solos de comportamento laterítico (L) e solos de comportamento não laterítico (N). Os solos de comportamento laterítico são subdivididos em três subgrupos: areias lateríticas (LA), solos arenosos lateríticos (LA') e solos argilosos lateríticos (LG'), enquanto os de comportamento não laterítico são subdivididas em quatro subclasses: areias não lateríticas (NA), solos arenosos não lateríticos (NA'), solos siltosos não lateríticos (NS') e solos argilosos não lateríticos (NG') (ver figura 2.3).

Os solos são classificados através de dois índices:

- 1) c' , que é obtido do ensaio mini-MCV e traduz a argilosidade do solo em análise; e
- 2) e' , que expressa o carácter laterítico do solo e é calculado mediante o uso da seguinte expressão:

$$e' = \sqrt[3]{\frac{20}{d'} + \frac{Pi}{100}} \quad (2.4)$$

onde Pi é a perda de massa por imersão expressa em porcentagem e d' é a inclinação do ramo seco da curva de compactação expressa em $\text{kg/m}^3 \%$, ambas obtidas em condições padronizadas, pelo uso do ensaio de compactação mini-MCV.

FIGURA 2.3 - Ábaco da classificação MCT (NOGAMI *et alii.*, 1993).

De posse desses dois índices consulta-se o ábaco apresentado na figura 2.3 e define-se então a classe do solo analisado.

A tabela 2.3 apresenta as classes da classificação MCT, a previsão das propriedades geotécnicas dos solos em função de cada uma dessas classes e a sua adequação para obras rodoviárias.

TABELA 2.3 - Quadro das propriedades dos solos de cada classe MCT
(NOGAMI *et alii.*, 1993).

COMPORTAMENTO			N= NÃO LATERÍTICO				L= LATERÍTICO		
Grupo	MCT		N A	N A'	N S'	N G'	L A	L A'	L G'
Propriedade	MINI CBR	Sem imersão	M, E	E	M, E	E	E	E,EE	E
		Com imersão	M, E	M, E	B, M	E	E	E	E
	EXPANSÃO		B	B	E	M, E	B	B	B
	CONTRAÇÃO		B	B, M	M	M, E	B	B, M	M, E
	COEF.PERMEABILIDADE (k)		M, E	B	B, M	B, M	B, M	B	B
	COEF. SORÇÃO (S)		E	B, M	E	M, E	B	B	B
Utilização (ordem de preferência)	Base de Pavimento		NR	4.º	NR	NR	2.º	1.º	3.º
	Reforço do Subleito		4.º	5.º	NR	NR	2.º	1.º	3.º
	Subleito Compactado		4.º	5.º	7.º	6.º	2.º	1.º	3.º
	NR: Não		Aterro Compactado (corpo)	4.º	5.º	6.º	7.º	2.º	1.º
Recomen- dado	Proteção à Erosão		NR	3.º	NR	NR	NR	2.º	1.º
	Revestimento Primário		5.º	3.º	NR	NR	4.º	1.º	2.º
Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima próxima da energia normal		Mini-CBR (%) sobrecarga padrão	Expansão (%) Contração (%)		Coef.sorção (S) $\log(\text{cm}/\sqrt{V_{\min}})$		Coef.permeab. (K) $\log(\text{cm/s})$		
B = baixo(a)		< 4	< 0,5		< (-2)		< (-6)		
M = médio(a)		4 a 12	0,5 a 3		(-2) a (-1)		(-6) a (-3)		
E = elevado(a)		12 a 30	> 3		> (-1)		> (-3)		
EE = muito elevado(a)		> 30							

2.5.3. O ENSAIO MINI-MCV

O ensaio mini-MCV é executado com energia de compactação variável e massa úmida de solo constante, conforme os procedimentos seguintes, descritos em COZZOLINO & NOGAMI (1993):

- a) pesar no mínimo 5 porções de solo, cada uma com 1 kg, adicionando-lhes água, de modo que a umidade seja crescente; depois, colocar o solo umedecido em um saco plástico hermeticamente fechado, deixando que a umidade se uniformize por, no mínimo, 10 horas;
- b) pesar 200 g de cada porção do solo, iniciando-se o processo de compactação pelo ponto mais úmido; colocar essa porção de solo no cilindro, posicionado no pistão inferior do aparelho de compactação e com um disco de polietileno sobre o topo desse pistão (para que não haja aderência do solo na base do aparelho de compactação); em seguida, apertar o topo da porção de solo com um cilindro adequado, colocando sobre a parte superior do corpo de prova a ser moldado, um outro disco espaçador plástico;
- c) aplicar o primeiro golpe e medir a altura A_1 do corpo de prova, utilizando-se um extensômetro posicionado na vertical; aplicar em seguida números de golpes sucessivos crescentes, de forma a totalizarem, somados com os golpes anteriormente dados, números de golpes n iguais a 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 32, 48, 64, 96, 128, 192 e 256, e fazer as leituras das alturas correspondentes a cada número de golpes ($A_1, A_2, A_3, A_4, A_6, A_8, A_{12}, A_{16}, A_{24}, A_{32}, A_{48}, A_{64}, A_{96}, A_{128}, A_{192}$ e A_{256});
- d) o processo de compactação é finalizado quando a diferença de altura $A_n - A_{4n}$ for menor que 0,1 mm, ou quando ocorrer exsudação ou quando o número de golpes totalizar 256;

e) repetir a sequência de *a* a *d* para os outros teores de umidade.

Para maiores detalhes sobre os resultados obtidos do ensaio mini-MCV, ver a tabela 2.4 que mostra a planilha, juntamente com os resultados dos cálculos que são efetuados após o término do ensaio para o solo D 20 % (solo de procedência da rodovia de Descalvado com 20 % de fração fina e 80 % de fração grossa).

Com os resultados do ensaio mini-MCV, traçam-se, para cada teor de umidade, as curvas de afundamento ou de mini-MCV, que são lançadas em um diagrama onde o eixo das abscissas está em escala logarítmica e representa o número de golpes, e o eixo das ordenadas representa o valor correspondente à diferença de leitura $A_n - A_{4n}$ (n é o número de golpes aplicados ao corpo de prova). Para cada curva de afundamento determina-se o valor do mini-MCV, bastando para isso verificar o ponto onde tal curva intercepta a reta de equação $a = 2$ mm, lendo, no eixo das abscissas, o valor do número de golpes (B_i) correspondente. O valor do mini-MCV será dado pela expressão definida a seguir:

$$\text{mini-MCV} = 10 \cdot \log_{10}(B_i) \quad (2.5)$$

O coeficiente c' (dado em mm/golpe) é determinado pela inclinação da reta tangente às curvas de afundamento e que passa no ponto de afundamento igual 2 mm e $\text{mini-MCV} = 10$.

O coeficiente d' é calculado a partir do coeficiente angular da parte mais inclinada do ramo seco da curva de compactação (teor de umidade X massa específica aparente seca) correspondente a 12 golpes, devendo ser expresso em $\text{kg/m}^3 \%$.

Exemplos de determinação dos coeficientes c' e d' são mostrados nas figuras 2.4 e 2.5, para o solo D 20 %.

TABELA 2.4 - Planilha de cálculo do ensaio mini-MCV para o solo D 20 %.

IDENTIFICAÇÃO :																
Argila:	Descalvado	Anf = 48,44			Anf = 46,18			Anf = 44,56			Anf = 42,91			Anf = 43,18		
Fg(%):	80															
Ff(%):	20															
MASSA DE ENSAIO																
CILINDRO N		58			7			103			20			57		
TARA DO CILINDRO (g)																
PESO DO SOLO ÚMIDO(g)																
PESO SOLO ÚMIDO (g)																
OBS:	N	An	N - 4N	D	An	N - 4N	D	An	N - 4N	D	An	N - 4N	D	An	N - 4N	D
	1	50,65	2,21	1,768	54,17	6,07	1,691	55,70	6,32	1,662	60,00	8,69	1,567	64,40	9,79	1,481
	2	48,60	0,16	1,843	50,48	4,21	1,815	52,21	5,33	1,773	55,02	6,42	1,709	58,96	7,71	1,618
	3	48,45	0,01	1,848	49,10	2,92	1,866	50,53	4,77	1,832	52,83	5,45	1,780	56,21	6,54	1,697
	4	48,44	0,00	1,849	48,10	1,92	1,905	49,38	4,30	1,875	51,31	4,73	1,833	54,61	5,84	1,747
	6				46,77	0,59	1,959	47,70	3,14	1,941	49,56	3,86	1,897	52,56	4,97	1,815
	8				46,27	0,09	1,980	46,88	2,32	1,975	48,60	3,60	1,935	51,25	4,47	1,862
	12				46,18	0,00	1,984	45,76	1,20	2,023	47,38	3,10	1,985	49,67	3,63	1,921
	16							45,08	0,52	2,054	46,58	2,85	2,019	48,77	3,37	1,956
	24							44,56	0,00	2,078	45,70	2,45	2,058	47,59	2,87	2,005
	32										45,00	2,09	2,090	46,78	2,43	2,039
	48										44,28	1,37	2,124	46,04	2,10	2,072
	64										43,73	0,82	2,150	45,40	1,85	2,101
	96										43,25	0,34	2,174	44,72	1,54	2,133
	128										42,91	0,00	2,191	44,35	1,17	2,151
	192													43,94	0,76	2,171
	256													43,55	0,37	2,191
	384													43,18	0,00	2,209
U	CÁPSULA	G.164			G.8			G.11			G.123			G.157		
M	PESO DO SOLO ÚMIDO + TARA (g)	61,35			60,37			77,65			59,32			58,56		
I	PESO DO SOLO SECO + TARA (g)	56,33			56,33			72,67			56,47			56,18		
D	TARA (g)	20,94			21,49			24,97			23,87			23,00		
A	SOLO SECO (g)	35,39			34,84			47,70			32,60			33,18		
D	AGUA (g)	5,02			4,04			4,98			2,85			2,38		
E	UMIDADE (%)	14,18			11,60			10,44			8,74			7,17		
PERDA	MASSA EXTRUDADA - Me = A.D	36,16			38,81			40,64			42,86			43,22		
	MASSA DESPRENDIDA - Md	95,00			83,48			59,59			49,74			0,55		
	FATOR DE CORREÇÃO (F)	1,00			1,00			1,00			1,00			1,00		
	PERDA - P = 100.Md/Me	262,73			215,11			146,63			116,05			1,27

FIGURA 2.4 - Determinação do coeficiente c' para o solo D 20 %.

FIGURA 2.5 - Determinação do coeficiente d' para o solo D 20 %.

2.5.4. O ENSAIO DE PERDA DE MASSA POR IMERSÃO

O ensaio de perda de massa por imersão foi criado com o objetivo de avaliar a erodibilidade dos solos tropicais. O ensaio é realizado nos corpos de prova que resultam do ensaio mini-MCV, devendo-se realizar as seguintes operações, de acordo com COZZOLINO & NOGAMI (1993):

- a) extrudar 1 cm do corpo de prova para fora do molde de compactação,
- b) colocar o conjunto (molde + cilindro) na posição horizontal, dentro do tanque de imersão, de forma que uma cuba possa coletar o material que eventualmente se desprender;
- c) depois de no mínimo doze horas, retirar o material desprendido e secá-lo em estufa.

O valor da perda de massa por imersão (expressa em porcentagem) para cada teor de umidade é determinada pela seguinte expressão:

$$P_i = \frac{M_d}{M_s} \cdot f \cdot 100 \quad (2.6)$$

onde :

M_d = massa seca eventualmente desprendida (g);

M_s = massa seca da parte extrudada do corpo de prova (g);

f = fator que assume o valor de 0,5 quando há desprendimento de blocos cilíndricos coesos (em forma de uma bolacha) e 1 para o restante dos casos.

Obtidos os valores da perda de massa por imersão para cada teor de umidade, traça-se a curva mini-MCV x P_i . O valor do coeficiente P_i do solo ensaiado será retirado dessa curva para mini-MCV = 10 ou mini-MCV = 15, conforme o solo seja de densidade baixa (se a altura final do corpo de prova para mini-MCV = 10 for maior que 48 mm) ou alta (se a altura final do corpo de prova para mini-MCV = 10 for menor que 48 mm), respectivamente.

Um exemplo de determinação do coeficiente P_i é mostrado na figura 2.6, para o solo D 20 %. Observar na tabela 2.4 que a altura final do corpo de prova para mini-MCV = 10 é menor do que 48 mm, portanto se trata de um solo de alta densidade, cuja a perda de massa por imersão deve ser determinada no ponto de mini-MCV = 15.

FIGURA 2.6 - Determinação do coeficiente P_i para o solo D 20 %.

2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As classificações tradicionais de solos existentes permitem agrupar em classes os solos com comportamento semelhante. Na prática, têm-se observado certas discrepâncias entre o comportamento previsto por estas classificações e o obtido em campo. Tentativas são feitas no sentido de melhor caracterizar os solos tropicais (como é o caso do método MCT), que possuem características particulares quando comparados com os solos das regiões de clima temperado. Atualmente, novas propostas de caracterizações de solos têm surgido, buscando maior simplicidade e praticidade no processo de caracterização.

No presente trabalho, procurou-se gerar subsídios para uma futura classificação de solos, fundamentada em ensaios simples e fáceis de serem executados; optou-se assim pelos ensaios de granulometria e de adsorção de azul de metileno, este último empregado com objetivo de qualificar a fração fina dos solos. O ensaio de adsorção de azul de metileno vem sendo utilizado como ferramenta valiosa no processo de caracterização e classificação de solos e será descrito no capítulo que se segue.

CAPÍTULO 3

A UTILIZAÇÃO DO ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO NA CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Na engenharia rodoviária, já é de conhecimento que os limites de liquidez e de plasticidade são inapropriados para caracterizar a parte fina dos solos tropicais. Estudos recentes realizados no Brasil, como o de FABBRI (1994), comprovam que o ensaio de adsorção de azul de metileno surge como uma alternativa bastante inovadora, eficiente, rápida e econômica para o processo de caracterização dos solos.

O ensaio de adsorção de azul de metileno constitui um dos mais importantes sustentáculos da presente pesquisa. É com base nesse ensaio que se pretende criar subsídios para um futuro sistema de classificação de solos, daí se dedicar um capítulo exclusivo para esse novo método (novo por praticamente não ter sido utilizado no Brasil).

3.2. FUNDAMENTOS DO MÉTODO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO

De acordo com MERCK & Co. (1952), o corante comumente denominado "azul de metileno" tem em Química a nomenclatura "cloridrato de metiltiamina" ou "cloreto de 3,7-Bis (dimetilamino) feniltianium", de composição química $C_{16}H_{18}N_3SCl \cdot 3H_2O$. Trata-se de um corante catiônico, ou seja, que em solução aquosa se dissocia em ânions cloreto e cátions "azul de metileno".

HANG & BRINDLEY (1970) advertem para a existência de duas fases no mecanismo da interação do azul de metileno com os argilo-minerais: troca de cátions e adsorção. Essas fases encontram-se descritas com bastante clareza no texto de CHEN *et alii* (1974):

"a) Troca de cátions: A molécula de azul de metileno dissocia-se na água e forma o cátion de azul de metileno ($C_{16}H_{18}N_3S^+$) que pode trocar com os cátions das argilas. Esta troca é uma relação preferencial que fixa o cátion de azul de metileno à superfície dos argilos-minerais; também, após os cátions das argilas terem sido trocados pelo cátion de azul de metileno, as superfícies das argilas transformam-se num estado não-molhável ou hidrofóbico. A troca de cátion de azul de metileno é considerada uma reação irreversível" (WORRAL¹ *apud* CHEN *et alii*, 1974). "Quando os cátions de azul de metileno na solução foram totalmente trocados, a solução fica límpida e incolor e as argilas tomam a cor azul. Nesta parte, o mecanismo é de absorção."

¹WORRAL, W. E. Adsorption of basic dyestuffs by clays. *Trans. Brit. Cer Soc.*, 57, N.º 4, april, 1958 *apud* CHEN, T. J.; SANTOS, P. S.; FERREIRA, H. C.; CALIL, S. F.; ZANDONADI, A. R.; CAMPOS, I. V. Determinação da capacidade de troca de cátions e da área específica de algumas argilas e caulins cerâmicos brasileiros pelo azul de metileno e sua correlação com algumas propriedades tecnológicas. *Cerâmica*. Vol XX. n.º 79. São Paulo, SP. 1974. p.310.

"b) Adsorção: Existem dois tipos de adsorção; i) adsorção física e ii) adsorção química. A adsorção física (physical adsorption) é baseada na força de atração de Van der Waals e a adsorção química (chemi-sorption) é baseada na ligação de hidrogênio (hydrogen bonding). O nível de energia da adsorção química é mais elevado que o da física. Vários autores estudaram esse fenômeno e apresentam várias teorias baseadas no equilíbrio entre moléculas adsorvidas pela argila e moléculas livres na solução."

"A 'adsorção' global de azul de metileno inclui primeiro, o mecanismo de absorção e, em seguida, o de adsorção" (CHEN *et alii*, 1974). Considerando o exposto em HANG & BRINDLEY (1970), tem-se, à rigor, uma "ab-adsorção", termo mais apropriado para descrever o fenômeno de uma forma global. Entretanto, o uso vem consagrando o termo "adsorção" para se referir ao processo como um todo.

FERREIRA (1988) apresenta a conotação físico-química para os termos absorção e adsorção. Segundo esse autor, o termo absorção significa "fixação de uma substância, geralmente líquida ou gasosa, no interior da massa de outra substância, em geral sólida, e resultante de um conjunto complexo de fenômenos de capilaridade, atrações eletrostáticas, reações químicas, etc." e o termo adsorção significa "fixação das moléculas de uma substância (o adsorvante) na superfície de outra substância (o adsorvente)". Pode-se perceber que absorção é fenômeno de dimensão volumétrica, enquanto adsorção é fenômeno de dimensão superficial.

3.3. PRINCIPAIS ESTUDOS COM SOLOS BASEADOS NO ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO

3.3.1. ESTUDOS REALIZADOS NO EXTERIOR

Um dos primeiros trabalhos a utilizar o ensaio de adsorção de azul de metileno na caracterização de solos foi o de LAN (1977), onde ele já alertava para o fato de o ensaio ser de alta reprodução, além de ser de execução fácil e rápida, permitindo que, a partir de então, o LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) realizasse inúmeras pesquisas nessa área.

O LCPC publicou, em 1979, um anteprojeto que descreve o princípio e os objetivos do ensaio, mostrando como ele é feito, qual a aparelhagem necessária à sua execução e quais os resultados obtidos com a sua realização. O coeficiente de atividade foi então definido como sendo igual a:

$$CA_2 = \frac{V_b \times 100}{\% < 2 \mu m} \quad (3.1)$$

onde:

CA_2 = coeficiente de atividade do solo para a fração menor que 0,002 mm;

V_b = valor de azul (quantidade de azul de metileno consumida durante o ensaio, em g por 100 g de solo);

$\% < 2 \mu m$ = porcentagem das partículas de solo menores que 0,002 mm.

LAN (1980) desenvolveu um estudo sobre a variação do consumo de azul de metileno para misturas de argila, mostrando que a presença de quantidade excessiva de elementos inertes presentes num solo não influencia a adsorção de azul de metileno.

KERGOET & CIMPELLI (1980) concluíram que o valor de azul (V_b) é um resultado global que traduz a qualidade e a quantidade da argila presente no material, sendo que, se a qualidade "tipo da argila" é constante, o valor de azul é função direta da quantidade de argila incorporada.

DENIS, TOURENQ & LAN (1980), ao aplicarem o método a misturas de caulinita, ilita e montmorilonita, observaram uma variação linear dos valores de azul em função da porcentagem desses componentes nas misturas. Concluíram que o valor de azul de um solo ou de uma rocha representa uma medida da superfície sobre a qual a água pode ser absorvida.

LAN (1981) adaptou a classificação de solos da RTR ("Recommandation pour les Terrassements Routiers"), introduzindo valores de azul para identificar as classes de solos, como mostra a tabela 3.1, concluindo que o valor de azul é um excelente critério para identificar e classificar os solos, pois o ensaio para a sua determinação é simples e eficiente.

Para AUTRET & LAN (1983), não se observa boa correlação entre os valores dos coeficientes de atividade, que traduzem os resultados obtidos do ensaio de azul de metileno, e os limites de Atterberg (de modo mais acentuado com relação ao limite de plasticidade); isto foi atribuído à grande variação do pH das suspensões solo + água, tendo-se observado que o valor de azul e o potencial de hidrogênio são grandezas inversamente proporcionais, o que levou os autores a recomendarem a fixação de um pH constante da solução solo + água, para execução do ensaio de azul de metileno.

TABELA 3.1 - Carta de classificação de solos da RTR ("Recommandation pour les Terrassements Routiers") com os valores de Vb, (LAN, 1981).

					Classe	Vb
					A ₀	< 0,1
Solos finos	D < 50 mm	IP < 10%			A ₁	0,1-1,5
	passado na	10% < IP < 20%			A ₂	1,5-5
	# 0,080 mm > 35%	20% < IP < 50%			A ₃	5-9
		IP > 50%			A ₄	> 9
Solos arenosos e pedregulhos com finos	D < 50 mm	5% < 0,080 mm < 12%	retido na #2 mm < 30%	ES > 35%	B ₁	< 0,1
	ES < 35%			B ₂	0,1-0,5	
	passado na		retido na #2 mm > 30%	ES > 25%	B ₃	< 0,1
	# 0,080 mm entre 5 e 35%	ES < 25%		B ₄	0,1-0,5	
		12% < 0,080 mm < 35%	IP < 10%		B ₅	0,5-1,5
			IP > 10%		B ₆	1,5-5
Solos com materiais finos e grossos	D > 50 mm	% na # 0,080 mm elevada			C ₁	> 1,5
	passado na	% na # 0,080 mm pequena	D < 250 mm		C ₂	0,1-1,5
	# 0,080 mm > 5%		D > 250 mm		C ₃	0,1-1,5
Solos e rochas insensíveis à água	passado na	D < 50 mm	retido na # 2 mm < 30%	D ₁	< 0,1	
			retido na # 2 mm > 30%	D ₂	< 0,1	
	# 0,080 mm < 5%	50 mm < D < 250 mm			D ₃	< 0,1
		D > 250 mm			D ₄	< 0,1
Rochas evolutivas	Material de estrutura fina, frágil, com pouca ou nenhuma argila				E ₁	< 1,5
	Material de estrutura grossa, com pouca ou nenhuma argila				E ₂	< 1,5
	Material evolutivo argiloso				E ₃	> 1,5

Obs.: D significa diâmetro máximo das partículas.

BOURGUET, BROQUET & ROUSSEAU (1985) propuseram um novo sistema de classificação de solos, com base nos resultados dos ensaios de azul de metileno e de granulometria. A classificação consta de um diagrama granulométrico e de um outro de sensibilidade à água (ver figuras 3.1 e 3.2).

A sensibilidade à água é avaliada medindo-se o consumo de corante durante o ensaio, o que permite calcular o valor da superfície específica do solo ensaiado. A partir do ensaio de granulometria, determinam-se os índices granulométricos de Rivière, que são: o índice de grossura $\bar{X}$ (média dos logaritmos das dimensões equivalentes das partículas ao longo da curva granulométrica, ou ainda o logaritmo da dimensão média equivalente das partículas) e o índice de evolução N (curvatura máxima da curva granulométrica calculada a partir de quatro pontos sucessivos dessa curva).

FIGURA 3.1 - Diagrama granulométrico segundo BOURGUET, BROQUET & ROUSSEAU (1985), sem escala.

O processo de classificação consiste em, primeiramente, determinar a classe do solo, consultando-se o diagrama mostrado na figura 3.1, com os parâmetros $\bar{X}$ e N . Obtida a classe do solo, consulta-se o diagrama da figura 3.2, através dos valores de $\bar{X}$ e da superfície específica (determinada do ensaio de azul), identificando se o solo é insensível à água, se tem sensibilidade do tipo siltosa ou argilosa.

FIGURA 3.2 - Diagrama de sensibilidade à água, $SE \times \bar{X}$, segundo BOURGUET, BROQUET & ROUSSEAU (1985).

LAUTRIN (1987) definiu o chamado índice de nocividade de um solo, usado para identificar as proporções dos principais argilo-minerais presentes na fração fina dos solos:

$$N = \frac{100 \times Vb}{C_2} \quad (3.2)$$

onde:

N = índice de nocividade;

V_b = valor de azul (quantidade de azul de metileno consumida durante o ensaio, em g por 100 g de solo);

C_2 = porcentagem do solo com dimensão máxima não superior a 0,002 mm.

FIGURA 3.3 - Variação do índice de nocividade em função da quantidade de montmorilonita e caulinita na mistura (LAUTRIN, 1987).

A identificação das porcentagens de argilo-minerais é feita por meio de consulta a gráficos cartesianos. No caso da mistura de dois argilo-minerais (ver figura 3.3), tem-se, em abscissas, a porcentagem de um dos minerais

(seu complementar revela a porcentagem do outro), e em ordenadas, o valor do índice de nocividade.

Uma vez que os valores de índice de nocividade do argilo-mineral montmorilonita são mais elevados que dos outros estudados (caulinita e illita), esse autor propôs um diagrama de nocividade de solos em função do índice de nocividade, que está associado à porcentagem de montmorilonita presente, conforme ilustrado na figura 3.4.

FIGURA 3.4 - Diagrama de nocividade dos solos (LAUTRIN, 1987). Em ordenadas, à direita, está o índice de nocividade (N), e à esquerda, a porcentagem de montmorilonita presente (M(%)).

Ainda na opinião de LAUTRIN (1987), o ensaio de azul de metileno é fundamental, uma vez que oferece um modo simples de “quantificar” o “papel” de uma fração argilosa e de identificar um mineral nocivo sem recorrer a outros métodos mais sofisticados.

Segundo HIGGS (1988), o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha é um meio rápido e de baixo custo para indicar a presença de montmorilonitas (esmectitas), requerendo menos de três horas para sua execução (a maior parte do tempo sendo destinada à preparação da amostra), tendo a vantagem de requerer pequena quantidade de material (em torno de 2 g).

FIGURA 3.5 - Classificação de solos finos segundo MAGNAN & YOUSSEFIAN (1989).

MAGNAN & YOUSSEFIAN (1989) apresentaram mais um sistema de classificação de solos baseado nos ensaios de granulometria e de adsorção de azul de metileno. Nesse sistema determina-se a classe do solo a partir da figura 3.5, onde nos eixos das abscissas e das ordenadas estão

3.3.2. ESTUDOS REALIZADOS NO BRASIL

CASANOVA (1986) analisou trinta e cinco amostras de solos lateríticos, medindo os valores da CTC (capacidade de troca catiônica) e da SE (superfície específica) pelos métodos tradicionais e pelo método de azul de metileno. A análise estatística dos dados mostrou que há uma correlação com nível de significância de 1 % entre os valores de CTC obtidos pelos dois métodos. O autor verificou ainda que a CTC determinada pelo método de azul de metileno foi sempre inferior à determinada pelos métodos tradicionais. Essa discrepância foi atribuída por esse autor ao fato de não haver uma completa adsorção de azul de metileno pela matéria orgânica humificada e por materiais amorfos/paracristalinos, além de não haver adsorção de azul de metileno pelos óxidos e hidróxidos livres de ferro e alumínio. Estes fatos, segundo o autor deveriam ser encarados como uma vantagem do método, que mede essencialmente a CTC e a SE dos argilo-minerías presentes nas amostras.

FABBRI & SÓRIA (1991) utilizaram o ensaio de mancha de azul de metileno para avaliar a variação do consumo do corante em função da classe dos solos determinadas pela classificação MCT. Os resultados permitiram relacionar coeficiente de atividade da fração argila e comportamento previsto por este sistema de classificação, indicando a possibilidade da utilização do ensaio de azul de metileno para previsão das propriedades dos solos. Os autores concluíram que os resultados do ensaio, quando acompanhados de análise granulométrica por sedimentação, podem indicar o grau de atividade dos argilo-minerais presentes no solo.

PEJON (1992) utilizou o ensaio de adsorção de azul de metileno, pelo método da mancha, na caracterização da fração fina de materiais inconsolidados, para fins de mapeamento geotécnico. Concluiu que “apenas com o resultado do ensaio de azul de metileno, que é simples e rápido de executar, pode-se estimar o comportamento laterítico ou não dos materiais

analisados, com uma probabilidade de 85 % de acerto.”, e acrescentou que “o ensaio de adsorção de azul de metileno é uma maneira simples e rápida de identificação do comportamento laterítico dos materiais inconsolidados em mapeamentos geotécnicos. Pode fornecer ainda informações complementares sobre a mineralogia da fração argilosa, quando associado à determinação da curva granulométrica completa do material”.

FABBRI (1994) relatou que o ensaio de adsorção de azul de metileno é uma maneira simples de identificar o comportamento laterítico dos solos e, quando aliado ao ensaio de granulometria com sedimentação, permite a obtenção de informações complementares sobre a mineralogia da fração argilosa dos solos. O ensaio consiste basicamente na determinação do chamado coeficiente de atividade (CA), que é fundamental na avaliação do grau atividade dos argilo-minerais presentes nos solos. Esse coeficiente, definido por FABBRI & SÓRIA (1991), é descrito pela expressão 3.3.

$$CA = 100 \cdot \frac{Va}{Pf} \quad (3.3)$$

onde:

Va = valor de azul (quantidade de azul de metileno consumida em g por 1 g de amostra de solo integral);

Pf = porcentagem em peso que o solo contém da fração cujo grau de atividade se quer avaliar.

FABBRI (1994) propôs um ábaco para avaliação do grau atividade da fração fina presente no solo analisado (ver figura 3.6). Nesse ábaco, o CA é dado pela tangente do ângulo formado entre o eixo das abscissas e a reta que passa pela origem dos eixos cartesianos e pelo ponto cuja abscissa assume

o valor da porcentagem de partículas com dimensões inferiores a 0,005 mm e cuja ordenada expressa o valor de azul.

FIGURA 3.6 - Ábaco para caracterização do grau de atividade da fração argila dos solos (FABBRI, 1994).

Esse autor definiu três graus de atividade para os grupos de argilo-minerais, segundo seus coeficientes de atividade (CA):

- "muito ativos ($CA > 80$) abrangem argilo-minerais dos grupos das montmorilonitas, vermiculitas, etc.;
- ativos ($11 < CA < 80$) abrangem argilo-minerais dos grupos das caulinitas e/ou ilitas, ou ainda combinações destes com os de grupos mais ativos e de grupos menos ativos, desde que em proporções compatíveis com o CA encontrado; e

c) pouco ativos ($CA < 11$) abrangem desde materiais inertes até argilo-minerais laterizados ou ainda combinações entre estes e os de outros grupos mais ativos, desde que em proporções compatíveis, também, com o valor de CA (neste caso, pequenas proporções)".

Esse mesmo autor relata ainda que:

"O que se pretende é medir ou quantificar a atividade da fração argila do solo e compará-la com valores de outros materiais, cuja a composição é conhecida, e dos quais também se conhece o comportamento ou desempenho em obras de engenharia".

3.4. EXECUÇÃO DO ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO PELO MÉTODO DA MANCHA

3.4.1. O CONCEITO DE VALOR DE AZUL DE METILENO DE UM SOLO

O valor de azul de metileno de um solo (V_a), definido por FABBRI (1994), é a quantidade de azul de metileno consumida em g por 1 g de solo, diferindo do valor de azul (V_b) usado pelos franceses, que foi definido pelo LCPC (1979) como sendo a quantidade de azul de metileno consumida, em g, por 100 g de solo.

O valor de azul (V_a) de um solo depende basicamente da natureza mineralógica de sua fração fina, e é dado pela expressão 3.4:

$$V_a = V \cdot \frac{P_{200}}{100} \cdot \left(1 + \frac{w}{100}\right) \quad (3.4)$$

onde:

Va = valor de azul, correspondente a quantidade de azul de metileno consumido por 1 g de amostra de solo integral expresso em ml de solução padrão por grama de solo, ou por 10^{-3} g de azul de metileno por g de solo (10^{-3} g/g de solo);

V = volume de solução padrão de azul de metileno adicionado à suspensão (ml);

P200 = porcentagem do solo que passa na peneira de número 200 (%);

w = teor de umidade do solo ensaiado (%).

3.4.2. EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS

De acordo com FABBRI (1994), para executar o ensaio em uma amostra são necessários os seguintes equipamentos, mostrados na figura 3.7:

- peneira de malha quadrada de abertura nominal igual a 0,074 mm;
- equipamento para destorroamento de solos;
- balança com precisão de centígrama;
- bureta de 25 ml de capacidade e graduada de 0,1 em 0,1 ml;
- suporte para bureta;
- cronômetro, com resolução de segundos;
- baguete cilíndrica de vidro, com aproximadamente 8 mm de diâmetro e 250 mm de comprimento;

- agitador magnético para soluções aquosas, com possibilidade de regulagem do número de rotações;
- frasco opaco com 1000 ml de capacidade;
- béquer de vidro pirex com capacidade de 250 ml;
- provetas de vidro com capacidade de 100 e 1000 ml;
- papel de filtro circular, com diâmetro entre 120 e 150 mm, para micro-cristais, com teor de cinzas inferior a 0,01 %, do tipo Reagen R-42, Whatman 42 ou similar;
- solução aquosa padrão de azul de metileno, com concentração de 1 g de sal anidro por litro de solução;
- água destilada;

FIGURA 3.7 - Equipamentos usados para execução do ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha.

3.4.3. PROCEDIMENTO DE EXECUÇÃO

O ensaio é executado de acordo com o seguinte procedimento, descrito em FABBRI (1994):

- a) passar uma porção do solo (seca ao ar) na peneira 200; pesar 1 g; colocar essa porção em um béquer com 100 ml de água destilada, que deve ser posicionado sobre o agitador magnético; em seguida, ligar o agitador;
- b) acrescentar ao béquer 1 ml de solução padrão de azul de metileno, por meio de uma bureta graduada e agitar por 1 min, para que haja a dispersão da solução água + corante + solo;
- c) capturar e pingar uma gota da suspensão sobre um papel de filtro, utilizando a baguete de vidro;
- d) observar a difusão da gota no papel, verificando se há ou não o aparecimento de uma áura azulada ou esverdeada em torno da borda que circunda o núcleo escuro da mancha formada; em caso afirmativo, diz-se que o teste é positivo e agita-se a solução por mais três minutos, tornando a pingar uma gota no papel de filtro para que haja confirmação do teste; em caso negativo, deve-se continuar a efetuar os procedimentos *b*, *c* e *d*, até que ocorra o aparecimento da áura azulada ou esverdeada, devendo-se repetir também o procedimento de confirmação;
- e) anotar o consumo de azul de metileno correspondente ao ponto de viragem (ponto em que aparece a áura azulada ou esverdeada).

Com o valor do volume do azul de metileno consumido pela fração fina do solo durante a realização do ensaio, obtém-se da expressão (3.4), o valor de azul (V_a).

A figura 3.8 ilustra um teste negativo e outro positivo para o ensaio de adsorção de azul de metileno pelo método da mancha.

FIGURA 3.8 - Exemplos do teste de mancha de azul de metileno.

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do ensaio de adsorção de azul de metileno na caracterização de solos, vem mostrando ser um método bastante eficaz, principalmente quanto à redução do tempo dispendido para a execução do ensaio e sob o aspecto econômico.

Tendo em vista que o ensaio de adsorção de azul de metileno permite qualificar a fração fina dos solos, buscou-se gerar subsídios para uma futura classificação de solos fundamentada nesse ensaio. Com essa finalidade, optou-se pela montagem de solos artificiais, obtidos a partir da mistura de

uma mesma fração grossa (retida na peneira de abertura nominal de 0,074 mm) com três tipos de frações finas (passadas na peneira de abertura nominal de 0,074 mm), cada uma com um grau de atividade diferente, conforme definido em FABBRI (1994), e teores diferentes de concentração. Dessa forma, procurou-se compreender a influência do teor e do tipo de fração fina das misturas nas propriedades tecnológicas dos solos.

Para cada tipo de fração fina, buscou-se também conhecer como essas propriedades variam em função do valor de azul (V_a), estabelecendo-se relações que permitem estimar os valores dessas propriedades quando conhecidos os valores de azul.

No capítulo que se segue são descritos, com maiores detalhes, os materiais usados para a composição dessas misturas e os métodos empregados para a determinação das propriedades tecnológicas de interesse.

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são descritos os métodos e os diferentes tipos de materiais empregados para a execução deste trabalho.

A idéia de compor solos artificiais já foi manifestada na década dos sessenta, quando SEED, WOODWARD & LUNDGREN (1964) variaram as proporções das frações fina e grossa presentes nos solos, com o objetivo de estudar o coeficiente de atividade de Skempton através do comportamento de solos compostos; a fração fina era então composta por teores variáveis de caulinita, illita e bentonita. Nesse trabalho os autores puderam constatar que o comportamento dessas misturas estavam em “excelente concordância com o previamente determinado por A. Casagrande mediante testes com uma ampla variedade de argilas naturais.”

SÓRIA (1977) apresentou um relatório técnico para o convênio DER - IPAI 44/77, onde mostrou uma primeira análise de resultados obtidos a partir de solos “montados” em laboratório. Dois solos foram estudados, um laterítico e o outro residual saprolítico. Esses solos foram submetidos a separação por peneiramento com lavagem na peneira de abertura nominal igual a 0,074 mm; o material retido nessa peneira foi denominado fração grossa, e o material passado, fração fina. As frações finas obtidas foram misturadas em diferentes porcentagens com sua fração grossa original. O objetivo do trabalho era mostrar as diferenças das propriedades

tecnológicas entre os solos arenosos lateríticos e os solos residuais saprolíticos.

Com o objetivo de gerar subsídios para uma futura classificação de solos baseada no ensaio de azul de metileno, testou-se a variação das propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos artificiais em função do comportamento resultante da mistura de materiais diferentes. Isto foi conseguido através da montagem de quinze solos artificiais, obtidos a partir da mistura de uma mesma fração grossa (retida na peneira de abertura nominal de 0,074 mm) com três tipos de frações finas (passadas na peneira de abertura nominal de 0,074 mm), cada uma com um grau de atividade e teores diferentes de concentração. Paralelamente, foram testadas as classificações usuais (HRB e USCS) e a MCT, para efeito de análise e comparação dos resultados, verificando-se como variam as classes das quinze amostras de solos em função do teor e do tipo da fração fina presente.

4.2. MATERIAIS EMPREGADOS

4.2.1. GENERALIDADES

FABBRI (1994) propôs um ábaco que permite avaliar a atividade da fração fina do solo, definindo três graus de atividade para os argilo-minerais presentes no solo. Nesse ábaco, o coeficiente de atividade é definido pela tangente do ângulo formado entre o eixo das abscissas e a reta que passa pela origem dos eixos cartesianos e pelo ponto cuja abscissa assume o valor da porcentagem de partículas com dimensões inferiores a 5 μm e cuja ordenada expressa o valor de azul (ver figura 3.6). Assim, solos que apresentam mesmo coeficiente de atividade são representados por uma mesma reta no ábaco de caracterização.

Considerando-se que um solo pode apresentar argilo-minerais ativos, pouco ativos e muito ativos, para a escolha da fração fina optou-se por trabalhar com três tipos de solos, cada um apresentando um grau de atividade diferente.

Cada solo natural foi peneirado a seco na peneira de nº 200. A parte passada foi armazenada e posteriormente foi misturada com uma fração grossa (areia quartzosa) cuja distribuição granulométrica foi previamente definida (ver item 4.2.3). Assim, utilizaram-se três matrizes de fração fina, que foram misturadas com uma mesma fração grossa em diferentes teores (0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %), resultando em um total de quinze solos "montados", cujas distribuições granulométricas são apresentadas nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3. Portanto, cada matriz fina deu origem a cinco solos com um mesmo coeficiente de atividade e granulometrias diferentes. Dessa forma, foi possível trabalhar, para cada uma das matrizes finas, sobre uma reta no ábaco proposto por FABBRI (1994).

Note-se que o processo de separação granulométrica usado neste trabalho é por via seca, diferindo do utilizado por SÓRIA (1977), em que as frações grossas e finas foram separadas por via úmida, mediante lavagem na peneira de abertura nominal igual 0,074 mm.

As quinze amostras de solos artificiais são identificadas com as iniciais D, CB e RB (indicando um solo de procedência de Descalvado, Castelo Branco e Ribeirão Bonito) seguidas dos teores de fração fina (exemplo: D 20 %, indica um solo de Descalvado com 20 % de fração fina).

A figura 4.1 mostra a localização dos solos "montados" no ábaco proposto por FABBRI (1994).

FIGURA 4.1 - Localização dos solos artificiais no ábaco proposto por FABBRI (1994).

TABELA 4.1 - Distribuição granulométrica dos solos de Descalvado.

Peneiras (mm)	D 20 % % que passa	D 40 % % que passa	D 60 % % que passa	D 80 % % que passa	D 100 % % que passa
2,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1,19	98,83	99,12	99,42	99,71	100,00
0,59	94,54	95,91	97,27	98,64	100,00
0,297	77,85	83,39	88,92	94,46	100,00
0,149	48,40	61,30	74,20	87,10	100,00
0,074	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00
0,05	18,46	36,92	55,38	73,85	92,31
0,005	14,62	29,23	43,85	58,46	73,08
0,002	13,08	26,15	39,23	52,31	65,38

TABELA 4.2 - Distribuição granulométrica dos solos da Castelo Branco.

Peneiras (mm)	CB 20 % % que passa	CB 40 % % que passa	CB 60 % % que passa	CB 80 % % que passa	CB 100 % % que passa
2,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1,19	98,83	99,12	99,42	99,71	100,00
0,59	94,54	95,91	97,27	98,64	100,00
0,297	77,85	83,39	88,92	94,46	100,00
0,149	48,40	61,30	74,20	87,10	100,00
0,074	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00
0,05	18,92	37,84	56,76	75,68	94,59
0,005	3,51	7,03	10,54	14,05	17,57
0,002	0,54	1,08	1,62	2,16	2,70

TABELA 4.3 : Distribuição granulométrica dos solos de Ribeirão Bonito

Peneiras (mm)	RB 20 % % que passa	RB 40 % % que passa	RB 60 % % que passa	RB 80 % % que passa	RB 100 % % que passa
2,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1,19	98,83	99,12	99,42	99,71	100,00
0,59	94,54	95,91	97,27	98,64	100,00
0,297	77,85	83,39	88,92	94,46	100,00
0,149	48,40	61,30	74,20	87,10	100,00
0,074	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00
0,05	18,42	36,84	55,26	73,68	92,11
0,005	13,16	26,32	39,47	52,63	65,79
0,002	9,21	18,42	27,63	36,84	46,05

4.2.2. FRAÇÃO FINA

A fração fina foi separada mediante peneiramento por via seca, totalizando 60 kg para cada uma das amostras. A tabela 4.4 mostra os teores de fração grossa e fina para as amostras compostas e os coeficientes de atividade de cada uma das frações finas estudadas, juntamente com seus respectivos graus de atividade.

TABELA 4.4 - Características das amostras e dos solos de origem.

Procedência	Descalvado					Castelo Branco					Ribeirão Bonito				
CA	CA = 5,6					CA = 40,1					CA = 100,7				
Grau de Atividade	Pouco Ativo					Ativo					Muito Ativo				
Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Fração Grossa(%)	0	20	40	60	80	0	20	40	60	80	0	20	40	60	80
Fração Fina (%)	100	80	60	40	20	100	80	60	40	20	100	80	60	40	20

Para obtenção da fração fina foram coletados três tipos de solos, a saber:

a) Solo de Descalvado

Foi coletado no km 139 + 500 m, à margem direita da rodovia SP-215, que liga os municípios paulistas de Descalvado e São Carlos. O solo natural de Descalvado foi classificado pela MCT como um solo argiloso laterítico (LG'), apresentando, de acordo com o ensaio de azul de metileno, fração fina pouco ativa (CA = 5,6).

b) Solo da rodovia Castelo Branco

Foi coletado no km 34 + 100 m, à margem esquerda da rodovia Presidente Castelo Branco (SP-280, sentido Sorocaba-São Paulo), no município paulista de Santana do Parnaíba. O solo natural da Castelo Branco foi classificado pela MCT como um solo siltoso não laterítico (NS') apresentando, de acordo com o ensaio de azul de metileno, fração fina ativa (CA = 40,1).

c) Solo da serra de Ribeirão Bonito

Foi coletado no km 182 + 930 m, à margem direita da rodovia SP-215, que liga os municípios paulistas de Ribeirão Bonito e São Carlos. O solo natural de Ribeirão Bonito foi classificado pela MCT como um solo argiloso não laterítico (NG'), apresentando, de acordo com o ensaio de azul de metileno, fração fina muito ativa (CA = 100,7).

O mapa apresentado na figura 4.2 mostra as rodovias onde os solos naturais foram coletados. Os detalhes dos trechos de coleta dos materiais encontram-se ilustrados nas figuras 4.3 e 4.4.

4.2.3. FRAÇÃO GROSSA

A fração grossa foi coletada na Mineração Jundu S.A., no município de Descalvado (SP), e peneirada a seco, totalizando 120 kg. A curva granulométrica da fração grossa foi definida em função das médias aritméticas de 66 amostras de solos utilizadas no trabalho de FABBRI (1994), nas quais 100 % das partículas passam integralmente na peneira de abertura nominal igual a 2 mm.

A tabela 4.5 mostra a distribuição granulométrica da areia selecionada, utilizada para execução da montagem de solos.

FIGURA 4.2 - Mapa do estado de São Paulo, mostrando as rodovias onde os solos naturais foram coletados.

FIGURA 4.3 - Detalhe do trecho de coleta dos solos de Ribeirão Bonito e Descalvado.

FIGURA 4.4 - Detalhe do trecho de coleta do solo da Castelo Branco.

TABELA 4.5 - Distribuição granulométrica da areia selecionada.

Peneiras (abertura em mm)	Porcentagem que passa (%)
4,76	100
2,00	100
1,19	98,54
0,59	93,18
0,297	72,31
0,149	35,50
0,074	0

4.3. MÉTODOS USADOS NA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

4.3.1. INTRODUÇÃO

Obtidos os três tipos de frações finas e a fração grossa selecionada, foram compostas 15 amostras de solos artificiais, misturando-se a fração grossa com cada uma das três frações finas, em cinco teores diferentes de concentração, conforme mostra a tabela 4.4.

Os ensaios de massa específica dos sólidos, granulometria (por peneiramento e por sedimentação), limite de liquidez, limite de plasticidade, mini-MCV e perda de massa por imersão, mini-CBR e adsorção de azul de metileno foram executados no Laboratório de Estradas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo; os ensaios de difratometria de raios X pelo método do pó no Laboratório de Raios X do grupo de cristalografia do Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo e as microscopias eletrônicas de varredura no Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo.

As quinze amostras de solos artificiais foram submetidas ao programa de ensaio descrito nos itens que se seguem.

4.3.2. MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS

A determinação da massa específica dos sólidos, necessária aos cálculos do ensaio de sedimentação, foi realizada de acordo com o método de ensaio "Densidade Real dos Solos" - ME 93-64, do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER.

4.3.3. GRANULOMETRIA

4.3.3.1. GRANULOMETRIA POR PENEIRAMENTO

A análise granulométrica por peneiramento da fração grossa foi executada de acordo com o método de ensaio "Análise Granulométrica de Solos" - ME 80-64, do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER.

4.3.3.2. GRANULOMETRIA POR SEDIMENTAÇÃO

A análise granulométrica por sedimentação dos três tipos de frações finas foi executada utilizando-se o método de ensaio "Análise Granulométrica de Solos"- ME 51-64, do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER. O defloculante usado para a dispersão das amostras foi o hexametáfosfato de sódio.

4.3.4. LIMITE DE LIQUIDEZ

O valor do limite de liquidez foi determinado conforme o método de ensaio ME 44-71, do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER. A determinação do limite de liquidez foi necessária para que as amostras de solos montados pudessem ser classificadas de acordo com as classificações HRB e USCS.

4.3.5. LIMITE DE PLASTICIDADE

O valor do limite de plasticidade foi determinado de acordo com o método de ensaio ME 82-63, do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER. A determinação do limite de plasticidade também se fez necessária para que as amostras pudessem ser classificadas de acordo com as classificações HRB e USCS.

4.3.6. MINI-CBR, EXPANSÃO E CONTRAÇÃO

Os ensaios de mini-CBR, expansão e contração foram realizados nas energias de compactação normal e intermediária, visando à determinação da capacidade de suporte dos solos e da RIS (relação entre índices de suporte), bem como as características de expansão e contração. Os ensaios foram executados de acordo com os procedimentos descritos nos métodos de ensaio DER M 192-88 (ensaio de mini-CBR), DER M 192-88 (ensaio de expansão) e DER M 193-88 (ensaio de contração), todos do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP, 1991).

4.3.7. MINI-MCV E PERDA DE MASSA POR IMERSÃO

Os ensaios de mini-MCV e perda de massa por imersão foram executados para fins de classificação dos solos compostos através do método MCT. Realizaram-se esses ensaios conforme os procedimentos dos métodos de ensaio DER M 191-88 (ensaio de mini-MCV) e DER M 196-88 (perda de massa por imersão), ambos do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP, 1991).

4.3.8. ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO

O ensaio de adsorção de azul de metileno foi executado segundo as etapas descritas no item 3.4.3 do capítulo 3, objetivando determinar os coeficientes de atividade das frações finas dos solos ensaiados. Trabalhou-se com o pH normal da suspensão solo + água, através da adição do solo à água destilada. A porção de solo ensaiada foi a passada na peneira de abertura nominal igual a 0,074 mm.

4.3.9. DIFRATOMETRIA DE RAIOS X PELO MÉTODO DO PÓ

O ensaio de difratometria de raios X foi executado nas frações finas de Descalvado, Castelo Branco e Ribeirão Bonito, com o objetivo de determinar os minerais constituintes em cada uma delas. Essas três frações finas foram passadas na peneira de nº 400 e posteriormente submetidas ao difratômetro de raios X. Foram utilizados tubo de raios X de cobre, corrente elétrica de 40 mA, tensão de 40 kV e velocidade de varredura de 2°/min.

4.3.10. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

O ensaio de MEV (microscopia eletrônica de varredura) foi executado objetivando observar a microestrutura dos argilo-minerais presentes nas frações finas dos solos ensaiados. As fotografias da microestrutura dos minerais presentes nas frações finas de Descalvado, Ribeirão Bonito e Castelo Branco, foram obtidas de FABBRI (1994), que utilizou um microscópio eletrônico de varredura da marca Zeiss, modelo DFM 960. As frações finas fotografadas foram passadas na peneira de abertura nominal igual a 0,074 mm.

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os materiais utilizados para se comporem as misturas artificiais de solos, bem como os métodos empregados para o estudo de seu comportamento, visando à determinação de subsídios para uma futura classificação de solos.

No capítulo seguinte, expõem-se os resultados dos diversos ensaios e procedimentos, acompanhados de análise crítica, objetivando identificar padrões de comportamento para as grandezas umidade ótima, massa específica aparente seca máxima, mini-CBR na umidade de moldagem e após 24 h de imersão, expansão, contração e relação entre índices de suporte, todas em função das variáveis em estudo, a saber: energia de compactação, teor de fração fina e valor de azul (Va).

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de laboratório executados com os solos artificiais.

Apresenta-se, graficamente, a variação das propriedades tecnológicas dos solos em função da energia de compactação, do teor de fração fina e do valor de azul. Utilizou-se a técnica de regressão para estabelecer equações que permitem estimar o valor das propriedades estudadas, conhecidos os valores de azul.

Os solos foram classificados segundo as classificações MCT, HRB e USCS, com o objetivo de comparar a previsão de propriedades fornecida por cada classificação em função da variação do teor e do tipo de fração fina.

5.2. MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS

A determinação da massa específica do sólidos (ρ_s) foi feita na fração grossa e em cada uma das frações finas e seus valores são mostrados na tabela 5.1.

TABELA 5.1- Massa específica dos sólidos para as frações grossa e finas.

Frações	ρ_s (g/cm ³)
Fração grossa	2,650
Fração fina D	2,629
Fração fina CB	2,752
Fração fina RB	2,782

Para os solos artificiais, os valores de massa específica dos sólidos foram obtidos mediante cálculo da média ponderada, considerando a parcela de contribuição das frações grossa e fina.

FIGURA 5.1 - Massa específica dos sólidos calculada para os solos artificiais.

Os valores assim calculados estão apresentados na figura 5.1. Observe-se que, de acordo com esta figura, a massa específica dos sólidos varia entre $2,629 \text{ g/cm}^3$ e $2,782 \text{ g/cm}^3$. Note-se que seu valor é menor para os solos de Descalvado e maior para os de Ribeirão Bonito.

5.3. GRANULOMETRIA

As curvas granulométricas dos solos artificiais são apresentadas nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4. A areia quartzosa selecionada foi submetida a análise granulométrica por peneiramento e as três frações finas foram submetidas a análise granulométrica por sedimentação. A partir dos resultados obtidos para as frações grossa e finas, calcularam-se as distribuições granulométricas para cada uma das amostras de solos artificiais, considerando os teores da fração grossa e fina e a origem da fração fina.

FIGURA 5.2 - Curvas granulométricas para os solos artificiais de Descalvado.

FIGURA 5.3 - Curvas granulométricas para os solos artificiais da Castelo Branco.

FIGURA 5.4 - Curvas granulométricas para os solos artificiais de Ribeirão Bonito.

Conforme mostram as curvas de cor azul nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4, observa-se que nas matrizes de fração fina de Descalvado e de Ribeirão Bonito há predominância de argila (partículas com dimensão máxima inferior a 0,005 mm), enquanto a matriz fina da Castelo Branco possui mais silte (partículas com dimensão máxima compreendida entre 0,005 mm e 0,074 mm).

5.4. LIMITE DE LIQUEZ E LIMITE DE PLASTICIDADE

Os valores de limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade obtidos para os solos artificiais encontram-se apresentados na tabela 5.2.

TABELA 5.2 - Resultados dos ensaios de limite de liquidez e de plasticidade para os solos estudados.

IDENTIFICAÇÃO	LL	LP	IP
D 20 %	21,60	NP	-
D 40 %	30,60	22,55	8,05
D 60 %	37,50	27,06	10,44
D 80 %	50,60	35,56	15,04
D 100 %	62,90	41,40	21,50
CB 20 %	19,70	NP	-
CB 40 %	29,90	NP	-
CB 60 %	41,30	NP	-
CB 80 %	54,00	NP	-
CB 100 %	64,40	NP	-
RB 20 %	26,90	NP	-
RB 40 %	39,20	28,12	11,08
RB 60 %	52,00	36,97	15,03
RB 80 %	63,70	44,56	19,14
RB 100 %	79,30	57,85	21,45

Observando-se a tabela 5.2, percebe-se que todos os solos da Castelo Branco resultaram não plásticos, o que é bastante razoável uma vez que se tratam de solos com quantidade considerável de silte. O mesmo comportamento é observado para os solos D 20 % e RB 20 %, pois trata-se de solos que apresentam pouca quantidade de fração fina (20 %), o que lhes confere pouca coesão.

Com o acréscimo de fração fina houve um aumento nos valores dos limites de liquidez e índices de plasticidade (quando foi possível determiná-los), o que indica que os solos artificiais têm um comportamento semelhante ao dos solos naturais.

A figura 5.5 mostra a variação dos valores de limites de liquidez em função do teor e do tipo de fração fina.

FIGURA 5.5 - Variação dos valores de limite de liquidez em função do tipo e do teor de fração fina para os solos artificiais.

5.5. MINI-CBR, EXPANSÃO E CONTRAÇÃO

Os ensaios de mini-CBR, expansão e contração foram realizados nas energias de compactação normal e intermediária e os resultados, para todos os solos estudados, encontram-se nos anexos I e II. As propriedades analisadas são: umidade ótima, massa específica aparente seca máxima, mini-CBR na umidade de moldagem, mini-CBR após 24 h de imersão, expansão, contração e relação entre índices de suporte (RIS).

Neste item apresentam-se três análises para cada uma das propriedades, onde são feitas combinações entre as variáveis fração fina e energia de compactação. Primeiramente, comparam-se os resultados dos ensaios, em ambas as energias, para os solos compostos de Descalvado, Castelo Branco e Ribeirão Bonito (fixa-se o tipo de fração fina e varia-se a energia de compactação). Em seguida, são feitas uma segunda e uma terceira análises, nas energias de compactação normal e intermediária, respectivamente, objetivando avaliar a variação das propriedades tecnológicas dos solos em função da variação do tipo de fração fina.

Os resultados para as diversas propriedades são apresentados graficamente (ver figuras de 5.6 a 5.12). Nesses gráficos, as expressões (I) e (N), que se unem às iniciais designativas da origem do solo (D, CB e RB), identificam os resultados dos ensaios nas energias de compactação intermediária e normal, respectivamente. Para melhor compreensão dessas análises, as curvas referentes à energia normal estão representadas com linhas grossas na cor verde e as referentes à energia intermediária com linhas mais finas na cor vermelha.

5.5.1. UMIDADE ÓTIMA

Os resultados da variação da umidade ótima em função da energia de compactação e do tipo de fração fina, para os solos artificiais, encontram-se apresentados na figura 5.6.

FIGURA 5.6 - Variação da umidade ótima para os solos artificiais em função da energia de compactação e do tipo de fração fina.

Mantendo-se constante o tipo de fração fina e variando-se a energia de compactação para os solos de Descalvado, Castelo Branco e Ribeirão Bonito, pode-se constatar que, para todos os solos estudados, a umidade ótima cresce com o teor de fração fina e é sempre maior na energia de compactação normal.

A partir da fixação da energia de compactação normal e variando-se o tipo de fração fina, pode-se notar que os valores da umidade ótima apresentam-se maiores para os solos de Ribeirão Bonito e menores para os solos da Castelo Branco, com magnitude intermediária para os solos de Descalvado. Observe-se ainda que as curvas apresentam um certo paralelismo, ou seja, têm aspecto de variação semelhante.

Mantendo constante a energia de compactação intermediária e fazendo variar o tipo de fração fina, pode-se notar que o comportamento é o mesmo da energia normal, ou seja, a umidade ótima varia de forma decrescente para os solos de Ribeirão Bonito, Descalvado e Castelo Branco.

5.5.2. MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA MÁXIMA

Os valores da massa específica aparente seca máxima em função da variação da energia de compactação e do tipo de fração fina, para os solos de Descalvado, Castelo Branco e Ribeirão Bonito, são apresentados na figura 5.7.

Mantendo-se constante o tipo de fração fina e variando-se a energia de compactação para os solos de Descalvado, Castelo Branco e Ribeirão Bonito, pode-se constatar que, para todos os solos estudados, a massa específica aparente seca máxima diminui com o teor de finos e é sempre maior na energia de compactação intermediária. Este comportamento já era esperado, pois, uma vez que se aumenta a energia de compactação, é natural que haja redução nos índices de vazios do solo, ocasionando acréscimo de sua massa específica aparente seca máxima.

Mediante fixação da energia de compactação normal e com variação do tipo de fração fina, pode-se observar que os valores de massa específica aparente seca máxima foram maiores para os solos de Descalvado.

Preservando inalterado o valor da energia de compactação intermediária e fazendo variar o tipo de fração fina, pode-se observar comportamento semelhante ao da energia de compactação normal.

FIGURA 5.7 - Variação da massa específica aparente seca máxima para os solos artificiais em função da energia de compactação e do tipo de fração fina.

5.5.3. MINI-CBR NA UMIDADE DE MOLDAGEM

Os resultados dos ensaios de mini-CBR na umidade de moldagem (mini-CBR-Hm) em função da energia de compactação e do tipo de fração fina encontram-se apresentados na figura 5.8.

Mantendo-se invariável o tipo de fração fina e variando-se a energia de compactação para os solos de Descalvado, Castelo Branco e Ribeirão Bonito, pode-se verificar que há uma tendência de o valor do mini-CBR na umidade de moldagem decrescer com a porcentagem de finos e ser sempre maior para a energia de compactação intermediária. Essa asserção, no universo em estudo, é verdadeira, desde que se desprezem os resultados obtidos para os solos D 60 % na energia de compactação intermediária e D 100 % na energia de compactação normal, pois parece razoável admitir que, para esses solos, tenha ocorrido algum tipo de imprecisão durante a execução dos ensaios.

FIGURA 5.8 - Variação do mini-CBR - Hm para os solos estudados em função da energia de compactação e do tipo de fração fina.

Uma das explicações para o aumento do valor de mini-CBR-Hm na energia de compactação intermediária é que, devido à intensidade desta ser superior à da energia normal, há uma maior aproximação entre as partículas sólidas do solo, aumentando a superfície de contato entre grãos e, conseqüentemente, a resistência do solo.

Observa-se ainda, conforme a figura 5.8, que os valores de mini-CBR-Hm para os solos de Descalvado variaram de 13 % a 26 % na energia de compactação normal e de 37 % a 60 % na energia de compactação intermediária; para os solos da Castelo Branco, variaram de 8,90 % a 23,50 % na energia de compactação normal e de 14,30 % a 29 % na energia de compactação intermediária; e para os solos de Ribeirão Bonito variaram de 12,60 % a 30 % na energia de compactação normal e de 24 % a 53 % na energia de compactação intermediária.

A partir da fixação da energia de compactação normal, pode-se verificar que não há um comportamento bem definido em função da variação do tipo de fração fina, observando-se alternância na magnitude relativa do mini-CBR na umidade de moldagem para os solos estudados.

Mantendo-se inalterada a energia de compactação intermediária e variando-se o tipo de fração fina, pode-se observar que os solos de Descalvado apresentaram valores de mini-CBR na umidade de moldagem superiores aos solos de Ribeirão Bonito e da Castelo Branco. Os valores menores de mini-CBR na umidade de moldagem, para essa energia, foram obtidos para os solos da Castelo Branco.

5.5.4. MINI-CBR APÓS 24 h DE IMERSÃO

Os resultados do ensaio de mini-CBR após 24 h de imersão (Mini-CBR-24 h) em função da energia de compactação e do tipo de fração

fina, para os solos de Descalvado, Castelo Branco e Ribeirão Bonito, encontram-se apresentados na figura 5.9.

FIGURA 5.9 - Variação do mini-CBR após 24 h de imersão para os solos artificiais em função da energia de compactação e do tipo de fração fina.

Mantendo-se constante o tipo de fração fina e variando-se a energia de compactação, pode-se perceber que há uma tendência de o mini-CBR após 24 h de imersão decrescer com o teor de finos e ser sempre maior para a energia de compactação intermediária. Esta asserção é verdadeira desde que se desprezem os resultados do ensaio para o solo D 100 % nas energias de compactação intermediária e normal. Observa-se ainda conforme a figura 5.9 que os valores de mini-CBR após 24 h de imersão para os solos de Descalvado variaram de 11 % a 23 % na energia de

compactação normal e de 30 % a 50 % na energia de compactação intermediária; para os solos da Castelo Branco variaram de 4,90 % a 9 % na energia de compactação normal e de 5,80 % a 17 % na energia de compactação intermediária; e para os solos de Ribeirão Bonito variaram de 6,80 % a 22 %, na energia de compactação normal e de 9 % a 31 % na energia de compactação intermediária.

Permanecendo inalterada a energia de compactação normal e variando o tipo de fração fina, pode-se observar que os valores de mini-CBR resultaram maiores para os solos de Descalvado e menores para os solos da Castelo Branco, com magnitude intermediária para os solos de Ribeirão Bonito.

Mediante fixação da energia de compactação intermediária e com variação do tipo de fração fina, pode-se observar comportamento semelhante ao da energia normal; assim, os valores de mini-CBR-24 h resultaram maiores para os solos de Descalvado e menores para os solos da Castelo Branco, com magnitude intermediária para os solos de Ribeirão Bonito.

5.5.5. EXPANSÃO

Os resultados da expansão em função da energia de compactação e do tipo de fração fina, para os solos de Descalvado, Castelo Branco e Ribeirão Bonito, são apresentados na figura 5.10.

Mantendo-se constante o tipo de fração fina e variando-se a energia de compactação, pode-se observar que, para os solos estudados, há uma tendência de a expansão aumentar com o aumento do teor de finos, exceto para os solos D 40 % na energia de compactação normal e CB 80 % na energia de compactação intermediária, cujos resultados podem estar associados a certas imprecisões do ensaio de expansão.

Quanto à variação da expansão em função da energia de compactação, pode-se observar que esta grandeza tende a aumentar com o acréscimo de energia, exceção feita aos solos D 40 % e CB 40 % (ambos na energia normal), o que também pode estar associada a imprecisões inerentes à execução do ensaio.

Observa-se ainda, conforme a figura 5.10, que os valores de expansão para os solos de Descalvado variaram de 0 % a 0,12 % na energia de compactação normal e de 0,03 % a 0,15 % na energia de compactação intermediária; para os solos da Castelo Branco variaram de 0,16 % a 3,30 % na energia de compactação normal e de 0,18 % a 3,50 % na energia de compactação intermediária; e para os solos de Ribeirão Bonito variaram de 0,05 % a 2,60 % na energia de compactação normal e de 0,10 % a 5 % na energia de compactação intermediária.

FIGURA 5.10 - Variação da expansão para os solos artificiais em função da energia de compactação e do tipo de fração fina.

Mantendo-se constante a energia de compactação normal e variando-se o tipo de fração fina, percebe-se que a expansão é baixa para o solo de Descalvado, sendo maior para os solos da Castelo Branco. Os solos de Ribeirão Bonito apresentaram comportamento intermediário.

Preservando inalterada a energia de compactação intermediária e fazendo variar o tipo de fração fina, percebe-se que a expansão é baixa para o solo de Descalvado, e que nos teores de 20 %, 60 % e 80 % de fração fina, os solos da Castelo Branco forneceram valores de expansão maiores que os solos de Ribeirão Bonito. Já nos teores de 40 % e 100 % de fração fina, os solos de Ribeirão Bonito apresentaram valores maiores de expansão.

5.5.6. CONTRAÇÃO

Os resultados da contração em função da energia de compactação e do tipo de fração fina, para os solos de Descalvado, Castelo Branco e Ribeirão Bonito, encontram-se apresentados na figura 5.11.

Mantendo-se constante o tipo de fração fina e variando-se a energia de compactação, pode-se observar que a contração sempre cresce com o aumento do teor de finos. Para os solos de Descalvado e de Ribeirão Bonito a contração mostrou-se maior para energia de compactação normal, enquanto para o solo da Castelo Branco a contração resultou maior para energia de compactação intermediária. Esta indefinição da variação da contração com a energia de compactação pode estar associada à natureza da fração fina dos solos estudados, pois os solos de Descalvado e Ribeirão Bonito apresentaram comportamentos semelhantes e suas frações finas são compostas, em sua maior parte, de argila, diferindo do solo da Castelo Branco, em que se encontra mais silte.

Observa-se ainda, conforme a figura 5.11, que os valores da contração para os solos de Descalvado variaram de 0,12 % a 1,50 % na energia de compactação normal e de 0,16 % a 0,80 % na energia de compactação intermediária; para os solos da Castelo Branco variaram de 0,16 % a 0,60 % na energia de compactação normal e de 0,18 % a 0,65 % na energia de compactação intermediária; e para os solos de Ribeirão Bonito variaram de 0,26 % a 3,50 % na energia de compactação normal e de 0,30 % a 1,70 % na energia de compactação intermediária.

FIGURA 5.11 - Variação da contração para os solos artificiais em função da energia de compactação e do tipo de fração fina.

Permanecendo fixa a energia de compactação normal e variando-se o tipo de fração fina, nota-se que os solos de Ribeirão Bonito apresentam valores maiores de contração, enquanto os da Castelo Branco exibem os menores

valores, e essa diferença é mais acentuada à medida que cresce o teor de finos. Os solos de Descalvado manifestaram comportamento intermediário com relação aos dos outros dois.

A partir da fixação da energia de compactação intermediária e da variação do tipo de fração fina, nota-se que os solos apresentaram comportamento semelhante ao da energia de compactação normal.

5.5.7. RELAÇÃO ENTRE ÍNDICES DE SUPORTE (RIS)

Os resultados da relação entre índices de suporte (definida como o quociente entre o valor de mini-CBR após 24 h de imersão e o valor de mini-CBR na umidade de moldagem), em função da energia de compactação e do tipo de fração fina, para os solos de Descalvado, Castelo Branco e Ribeirão Bonito, encontram-se apresentados na figura 5.12.

Mantendo fixo o tipo de fração fina e variando a energia de compactação, pode-se observar que parece não haver lei alguma que governe a variação da RIS em função da energia de compactação para os solos de Descalvado e Castelo Branco. Para o caso particular do solo de Ribeirão Bonito, pode-se afirmar que a RIS forneceu valores maiores para a energia de compactação normal. Observa-se ainda, conforme a figura 5.12, que os valores da RIS para os solos de Descalvado variaram de 70,59 % a 88,46 % na energia de compactação normal e de 68,18 % a 97,30 % na energia de compactação intermediária; para os solos da Castelo Branco variaram de 38,10 % a 55,06 % na energia de compactação normal e de 29 % a 58,62 % na energia de compactação intermediária; e para os solos de Ribeirão Bonito variaram de 53,97 % a 73,33 % na energia de compactação normal e de 37,50 % a 58,49 % na energia de compactação intermediária.

FIGURA 5.12 - Variação da RIS para os solos artificiais em função da energia de compactação e do tipo de fração fina.

A partir da fixação da energia de compactação normal e da variação do tipo de fração fina, pode-se notar que os valores da relação entre índices de suporte, conforme mostrados na figura 5.12, são maiores para os solos de Descalvado e menores para os da Castelo Branco, exceção feita unicamente para o solo CB 100 % que apresentou RIS ligeiramente maior que a do solo RB 100 %.

Mediante fixação da energia de compactação intermediária acompanhada de variação do tipo de fração fina, pode-se observar que os valores da relação entre índices de suporte são sempre maiores para os solos de Descalvado.

Ainda com relação à figura 5.12 é interessante notar que os solos compostos de Descalvado, que têm comportamento laterítico, apresentaram

valores de RIS, para ambas as energias, sempre maiores que 50 %; este resultado está de acordo com VILLIBOR (1981), que afirma que solos lateríticos devem apresentar valores de RIS não inferiores a 50 %. Entretanto, valores de RIS sempre superiores a 50 % também foram obtidos para todos os solos compostos de Ribeirão Bonito e CB 100 % na energia normal, e para os solos CB 20 % e RB 20 % na energia intermediária; todos esses solos têm comportamento não laterítico, apresentando discordância quanto ao critério proposto por aquele autor, segundo o qual para solos de comportamento não laterítico são esperados valores de RIS inferiores a 50 %.

5.6. CLASSIFICAÇÕES MCT, HRB E USCS

Conhecidos os resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos, limites de liquidez e plasticidade, granulometria, mini-MCV e perda de massa por imersão, procedeu-se à classificação dos solos. Os resultados das classificações MCT, HRB e USCS são apresentados na tabela 5.3. A análise e a discussão encontram-se nos sub-ítems que se seguem.

TABELA 5.3 - Resultados das classificações MCT, HRB e USCS para os solos estudados.

IDENTIFICAÇÃO	MCT	HRB	USCS
D 20 %	LA	A-2-4	SM
D 40 %	LG'	A-4	SC
D 60 %	LG'	A-6	MH
D 80 %	LG'	A-7-5	MH
D 100 %	LG'	A-7-5	MH
CB 20 %	NA	A-2-4	SM
CB 40 %	NS'	A-4	SM
CB 60 %	NS'	A-5	ML
CB 80 %	NS'	A-5	MH
CB 100 %	NS'	A-6	MH
RB 20 %	NA'	A-2-4	SM
RB 40 %	NG'	A-6	SM
RB 60 %	NG'	A-7-5	MH
RB 80 %	NG'	A-7-5	MH
RB 100 %	NG'	A-7-5	MH

5.6.1. COMENTÁRIOS SOBRE A CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS NA CARTA MCT

5.6.1.1. DIFICULDADES ENCONTRADAS

Para que os solos possam ser classificados pelo método MCT é necessário que se determinem os coeficientes c' e e' , obtidos dos ensaios de mini-MCV e de perda de massa por imersão. A execução desses ensaios nem sempre foi bem sucedida, principalmente quando se trabalhou com os solos montados a partir da fração fina proveniente da rodovia Castelo Branco.

Com referência a esses solos, uma das principais dificuldades encontradas foi quanto à determinação do coeficiente P_i . Para que se possa determinar

este coeficiente é necessário que as curvas de afundamento estejam espaçadas de teores de umidade crescentes, e que pelo menos uma esteja localizada além ou sobre o ponto de mini-MCV = 10 ou mini-MCV = 15, uma vez que o coeficiente P_i deve ser retirado ou no ponto de mini-MCV = 10 ou no de mini-MCV = 15, conforme o solo seja de densidade baixa ou alta, respectivamente.

Os solos da Castelo Branco foram colocados em teores de umidades crescentes, parecendo estarem, aparentemente, nos pontos ideais de espaçamento de teores de umidade. Quando se procedeu à compactação, notou-se que as curvas de afundamento se agrupavam ou antes ou depois do ponto de mini-MCV = 10, indicando que as umidades estavam demasiadamente altas ou baixas. Esses solos foram então postos para secar ao ar e, posteriormente, foram recolocados em teores crescentes de umidade. Algumas vezes chegou-se a repetir esse processo mais de sete vezes, sendo que quase sempre se utilizaram mais de cinco teores diferentes de umidades.

Ainda com respeito aos solos da Castelo Branco, a principal dificuldade foi não se ter conseguido determinar o valor do coeficiente P_i para o solo CB 20 %. A figura 5.13 mostra as curvas de afundamento para esse solo; observe-se que elas cruzam praticamente no mesmo ponto, apesar de estarem com um espaçamento de quase 2 % no teor de umidade. Chegou-se a trabalhar com o solo quase seco (2,58 % de umidade), mas a curva de afundamento continuou a cruzar em um mesmo ponto. Para esse solo, necessitava-se tirar o coeficiente P_i no ponto de mini-MCV = 15 (solo de densidade alta); como não se conseguia uma curva de afundamento que passasse além desse ponto, arbitrou-se o valor de P_i igual a 250 %, que parece ser bastante razoável, uma vez que, nos diversos teores de umidade em que os solos foram ensaiados (10 pontos), os valores das perdas de massa por imersão variaram de 250 % a 260 %.

FIGURA 5.13 - Curvas de afundamento para o solo CB 20 %.

5.6.1.2. VARIAÇÃO DAS CLASSES DE SOLOS NA CARTA MCT

A figura 5.14 mostra a posição dos solos no ábaco MCT e a trajetória definida pelas amostras em função do tipo de fração fina presente. Analisando-se os resultados apresentados nessa figura, pode-se perceber que:

- a) O índice c' nem sempre cresce com o teor de fração fina presente nos solos, o que contraria o esperado, uma vez que, se o índice c' traduz a argilosidade dos solos, como afirmado por NOGAMI & VILLIBOR (1995), seria de se esperar que, para teores crescentes de fração argila, se obtivessem valores crescentes de c' , o que nem sempre aconteceu, principalmente para teores mais altos dessa fração;

FIGURA 5.14 - Localização dos solos artificiais na classificação MCT.

- b) O índice e' não é constante para as amostras provenientes de uma mesma matriz argilosa. De acordo com NOGAMI & VILLIBOR (1995), o índice e' traduz o caráter laterítico dos solos; assim, para uma mesma matriz fina, deveriam resultar valores similares desse índice, uma vez que se trata de solos com um mesmo "grau de intemperismo", pois só foram variadas as proporções das frações fina e grossa.

Podem-se explicar parcialmente esses comportamentos "anômalos", uma vez que, para o caso do coeficiente c' , pode haver um melhor ou pior entrosamento das partículas em função dos teores das frações fina e grossa e, portanto, para teores altos de fração fina, os solos podem passar a ser mais difíceis de compactar, resultando valores de c' menores que os esperados.

Quanto aos valores do coeficiente e' , o comportamento irregular pode ser devido a esse coeficiente incorporar, em seu cálculo, os parâmetros d' e P_i . O parâmetro d' traduz o ganho de densidade com a variação do teor de umidade, e o P_i , a coesão permanente mais a expansão diferencial do material quando imerso. Isso pode fazer que, quando se variam os teores das frações fina e grossa na mistura, se obtenham variações desses dois parâmetros de um modo tal que a resultante (e') não seja constante.

5.6.1.3. COMPARAÇÃO ENTRE A PREVISÃO DE PROPRIEDADES DOS SOLOS PELO ÁBACO DA MCT E OS RESULTADOS OBTIDOS EM LABORATÓRIO

Neste item, apresenta-se uma comparação entre a previsão de propriedades dos solos fornecida pelo ábaco da classificação MCT (ver tabela 2.3) e os valores dos resultados obtidos em laboratório na energia de compactação normal (mini-CBR sem imersão, mini-CBR com imersão,

expansão e contração). Os valores de cada uma dessas propriedades, para os quinze solos estudados, foram apresentados, com maiores detalhes, no item 5.5.

a. Solos de Descalvado

O solo D 20 % foi classificado pela MCT como uma areia laterítica (LA). De acordo com o ábaco de previsão de propriedades dado pela MCT, esse solo deve apresentar valores de mini-CBR sem imersão e com imersão elevados (variando de 12 % a 30 %), expansão e contração baixas (menores que 0,5 %). Os resultados de laboratório para os ensaios de mini-CBR, expansão e contração na energia normal indicaram concordância com a previsão de propriedades do ábaco MCT.

Os solos D 40 %, D 60 %, D 80 % e D 100 % foram classificados como solos argilosos lateríticos (LG'). Conforme o ábaco de previsão de propriedades dado pela MCT, esse solos devem apresentar valores de mini-CBR sem imersão e com imersão elevados (variando de 12 % a 30 %), expansão baixa (menor que 0,5 %) e contração de média a elevada (variando de 0,5 % a valores maiores que 3 %). Os resultados de laboratório para os ensaios de mini-CBR sem imersão, expansão e contração na energia normal mostraram concordância com a previsão de propriedades dadas pelo ábaco MCT. Para os valores de mini-CBR com imersão houve discordância para o solo D 80 % que apresentou um valor de mini-CBR com imersão de 11 %.

Na tabela 5.4 apresenta-se um resumo das informações necessárias à Verificação da concordância entre resultados previstos pela classificação MCT e obtidos em laboratório, para os solos de Descalvado.

TABELA 5.4 - Verificação da concordância entre resultados previstos pela classificação MCT e obtidos em laboratório, para os solos de Descalvado.

S O L O		D 20 %	D 40 %	D 60 %	D 80 %	D 100 %
Propriedades	Classe MCT	LA	LG'	LG'	LG'	LG'
Mini-CBR-Hm (%)	Previsão	12 a 30	12 a 30	12 a 30	12 a 30	12 a 30
	Resultado	26,00	19,00	17,00	13,00	17,30
	Concordância	sim	sim	sim	sim	sim
Mini-CBR-24 h (%)	Previsão	12 a 30	12 a 30	12 a 30	12 a 30	12 a 30
	Resultado	23,00	15,00	12,00	11,00	14,50
	Concordância	sim	sim	sim	não	sim
Expansão (%)	Previsão	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
	Resultado	0,00	0,12	0,00	0,02	0,04
	Concordância	sim	sim	sim	sim	sim
Contração (%)	Previsão	< 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5
	Resultado	0,12	0,55	0,90	1,30	1,50
	Concordância	sim	sim	sim	sim	sim

b. Solos da rodovia Castelo Branco

O solo CB 20 % foi classificado pela MCT como uma areia não laterítica (NA). De acordo com o ábaco de previsão de propriedades dado pela MCT, esse solo deve apresentar valores de mini-CBR sem imersão e com imersão de médios a elevados (variando de 4 % a 30 %), expansão e contração baixas (menores que 0,5 %). Há concordância entre os resultados obtidos em laboratório para essas propriedades e os esperados.

Os solos CB 40 %, CB 60 %, CB 80 % e CB 100 % foram classificados pela MCT como solos siltosos não lateríticos (NS'). Segundo o ábaco de previsão de propriedades dado pela MCT, esses solos devem apresentar valores de mini-CBR sem imersão de médios a elevados (variando de 4 % a 30 %) e de mini-CBR com imersão de baixos a médios (variando de 0 % a 12 %), expansão elevada (maior que 3 %) e contração média (variando de 0,5 % a 3 %). Os resultados de laboratório mostram que há concordância com a

previsão de propriedades indicadas pela MCT somente para o solo CB 100 %. Para os demais solos (CB 40 %, CB 60 % e CB 80 %), somente os valores de mini-CBR com e sem imersão indicaram um comportamento previsível. Observe-se que os valores de expansão e contração obtidos pelos ensaios de compactação, na energia normal, para os solos CB 40 %, CB 60 % e CB 80 % mostram que a expansão varia de 1,50 % a 2,60 % e a contração de 0,27 % a 0,50 %; dessa forma, os solos apresentaram uma expansão média e uma contração de baixa a média, indicando um comportamento não previsível pelo ábaco de propriedades da MCT, a menos do valor da contração para o solo CB 80 %, que resultou igual a 0,5 %.

Na tabela 5.5 apresenta-se um resumo das informações necessárias à Verificação da concordância entre resultados previstos pela classificação MCT e obtidos em laboratório, para os solos da Castelo Branco.

TABELA 5.5 - Verificação da concordância entre resultados previstos pela classificação MCT e obtidos em laboratório, para os solos da Castelo Branco.

S O L O		CB 20 %	CB 40 %	CB 60 %	CB 80 %	CB 100 %
Propriedades	Classe MCT	NA	NS'	NS'	NS'	NS'
Mini-CBR-Hm (%)	Previsão	4 a 30	4 a 30	4 a 30	4 a 30	4 a 30
	Resultado	23,50	21,00	17,00	13,00	8,90
	Concordância	sim	sim	sim	sim	sim
Mini-CBR-24 h (%)	Previsão	4 a 30	0 a 12	0 a 12	0 a 12	0 a 12
	Resultado	9,00	8,00	6,40	5,30	4,90
	Concordância	sim	sim	sim	sim	sim
Expansão (%)	Previsão	< 0,5	> 3	> 3	> 3	> 3
	Resultado	0,16	1,50	2,40	2,60	3,30
	Concordância	sim	não	não	não	sim
Contração (%)	Previsão	< 0,5	0,5 a 3	0,5 a 3	0,5 a 3	0,5 a 3
	Resultado	0,16	0,27	0,40	0,50	0,60
	Concordância	sim	não	não	sim	sim

c. Solos da serra de Ribeirão Bonito

O solo RB 20 % foi classificado pela MCT como solo arenoso não laterítico (NA'). De acordo com o ábaco de previsão de propriedades dado pela MCT, esse solo deve apresentar valores de mini-CBR sem imersão elevados (variando de 12 % a 30 %) e de mini-CBR com imersão de médios a elevados (variando de 4 % a 30 %), expansão baixa (menor que 0,5 %) e contração de baixa a média (variando de 0 % a 3 %). Os resultados de laboratório mostram que há concordância com a previsão de propriedades obtida pela MCT para o solo RB 20 %.

Os solos RB 40 %, RB 60 %, RB 80 % e RB 100 % foram classificados pela MCT como solos argilosos não lateríticos (NG'). Conforme o ábaco de previsão de propriedades dado pela MCT, esses solos devem apresentar valores de mini-CBR sem imersão e com imersão elevados (variando de 12 % a 30 %), expansão e contração de médias a elevadas (variando de 0,5 % a valores maiores que 3 %). Os resultados de laboratório revelam-se compatíveis com a previsão de propriedades indicadas pela MCT quanto aos valores de expansão, contração e mini-CBR sem imersão para os solos RB 60 %, RB 80 % e RB 100 %. O valor de expansão para o caso do solo RB 40 % resultou igual a 0,4 %, não apresentando, portanto, concordância com o esperado. Quanto ao valor mini-CBR com imersão, houve concordância somente para o solo RB 40 % que apresentou valor de 12,50 %. Para os solos RB 60 %, RB 80 % e RB 100 %, os valores de mini-CBR variaram de 6,80 % a 8,20 %, indicando um comportamento não previsível pelo ábaco de propriedades da MCT, uma vez que, de acordo com este ábaco, eles deveriam variar de 12 % a 30 %.

Na tabela 5.6 apresenta-se um resumo das informações necessárias à Verificação da concordância entre resultados previstos pela classificação MCT e obtidos em laboratório, para os solos de Ribeirão Bonito.

TABELA 5.6 - Verificação da concordância entre resultados previstos pela classificação MCT e obtidos em laboratório, para os solos de Ribeirão Bonito.

S O L O		RB 20 %	RB 40 %	RB 60 %	RB 80 %	RB 100 %
Propriedades	Classe MCT	NA'	NG'	NG'	NG'	NG'
Mini-CBR-Hm (%)	Previsão	12 a 30	12 a 30	12 a 30	12 a 30	12 a 30
	Resultado	30,00	20,00	14,00	12,60	12,60
	Concordância	sim	sim	sim	sim	sim
Mini-CBR-24 h (%)	Previsão	4 a 30	12 a 30	12 a 30	12 a 30	12 a 30
	Resultado	22,00	12,50	8,20	8,00	6,80
	Concordância	sim	sim	não	não	não
Expansão (%)	Previsão	< 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5
	Resultado	0,05	0,40	1,40	1,58	2,60
	Concordância	sim	não	sim	sim	sim
Contração (%)	Previsão	0 a 3	> 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5
	Resultado	0,26	0,80	1,40	2,70	3,50
	Concordância	sim	sim	sim	sim	sim

5.6.2. COMPARAÇÃO ENTRE AS CLASSES DOS SOLOS OBTIDAS PELOS SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO HRB, USCS E MCT

As classificações USCS e HRB apresentam informações qualitativas sobre o comportamento do material como subleito. Porém, essas classificações possuem o inconveniente de atribuir o mesmo adjetivo a classes de solos que apresentam desempenhos diferentes quando empregados na execução de subleitos de estradas. Pode-se exemplificar o caso dos solos A-1 (pedra britada, pedregulho e areia) e A-2 (areia e areia siltosa ou argilosa), que possuem previsão de comportamento de excelente a bom de acordo com a classificação HRB, apesar de o solo A-1 ter um desempenho melhor do que o solo A-2.

A classificação MCT apresenta uma forma diferente de classificar solos. Ao invés de classificá-los por meio de atribuição de um adjetivo, indica uma ordem de preferência para os diferentes empregos em pavimentação, a

saber: base de pavimento, reforço do subleito, subleito compactado, aterro compactado (corpo), proteção à erosão e revestimento primário.

Assim, para que se possa comparar de uma maneira prática o comportamento dos solos estudados nos três sistemas de classificação, por meio de adjetivos que expressem suas qualidades como subleito compactado, lançou-se mão do seguinte artifício: elaborar uma escala de adjetivos, fundamentada em uma ordem decrescente de eficácia quanto ao emprego dos solos em pavimentação. Desse modo, sete diferentes qualificações foram idealizadas: excelente, excelente a bom, bom, bom a regular, regular, regular a mau e muito mau, conforme apresentado na tabela 5.7.

Conforme mostrado na tabela 2.3, a classificação MCT classifica os materiais em ordem de preferência para diferentes usos em pavimentação. Essa ordem serviu de base para estabelecer uma correspondência entre os adjetivos propostos e as classes do método MCT.

Já a classificação HRB apresenta apenas duas categorias de qualificação de solos como subleito, atribuindo às classes A-1-a, A-1-b, A-3 A-2-4, A-2-5, A-2-6 e A-2-7 comportamento de excelente a bom, e às classes A-4, A-5, A-6, A-7-5 e A-7-6 comportamento de fraco a pobre. O critério adotado para atribuição de adjetivos às classes de solos fundamenta-se em informações sobre a granulometria e nos valores de limites de liquidez e de plasticidade dos solos, de modo que um solo será tanto melhor quanto mais à esquerda estas suas propriedades estiverem representadas na tabela de classificação do método.

A classificação USCS apresenta, como citado em VARGAS (1977), informações qualitativas de cada uma das classes dos solos quanto a trabalhabilidade como material de fundação. Assim, conferiu-se ordem decrescente de qualidade às classes dos solos como material de subleito, baseadas nas informações contidas em VARGAS (1977).

De acordo com as considerações feitas, elaborou-se a tabela 5.8, que apresenta de forma qualitativa o comportamento como subleito de cada um dos quinze solos compostos.

TABELA 5.7 - Proposta de classificação qualitativa das classes de solos como subleito compactado nos sistemas de classificação USCS, HRB e MCT.

Qualidade como subleito compactado	USCS	HRB	MCT
excelente	GW, GC, SC, SW e GP	A - 1	LA'
excelente a bom	GM	A - 3	LA
bom	SP	A - 2	LG'
bom a regular	SM	A - 4	NA
regular	-	A - 5	NA'
regular a mau	ML e CL	A - 6	NG'
muito mau	OL, CH, MH, OH e PT	A - 7	NS'

TABELA 5.8 - Comparação qualitativa da classificação dos solos estudados pelos métodos MCT, HRB e USCS.

SOLOS	MCT	HRB	USCS
D 20 %	excelente a bom (LA)	bom (A-2-4)	bom a regular (SM)
D 40 %	bom (LG')	bom a regular (A-4)	excelente (SC)
D 60 %	bom (LG')	regular a mau (A-6)	muito mau (MH)
D 80 %	bom (LG')	muito mau (A-7-5)	muito mau (MH)
D 100 %	bom (LG')	muito mau (A-7-5)	muito mau (MH)
CB 20 %	bom a regular (NA)	bom (A-2-4)	bom a regular (SM)
CB 40 %	muito mau (NS')	bom a regular (A-4)	bom a regular (SM)
CB 60 %	muito mau (NS')	regular (A-5)	regular a mau (ML)
CB 80 %	muito mau (NS')	regular (A-5)	muito mau (MH)
CB 100 %	muito mau (NS')	regular a mau (A-6)	muito mau (MH)
RB 20 %	regular (NA')	bom (A-2-4)	bom a regular (SM)
RB 40 %	regular a mau (NG')	regular a mau (A-6)	bom a regular (SM)
RB 60 %	regular a mau (NG')	muito mau (A-7-5)	muito mau (MH)
RB 80 %	regular a mau (NG')	muito mau (A-7-5)	muito mau (MH)
RB 100 %	regular a mau (NG')	muito mau (A-7-5)	muito mau (MH)

Observando-se a tabela 5.8, percebe-se que:

- a) as classificações tradicionais apresentam resultados semelhantes para os solos de Ribeirão Bonito;
- b) quando se trabalha com solo laterítico (caso do solo de Descalvado), a classificação MCT dá resultados melhores que aqueles fornecidos pelas classificações tradicionais; diante de tal resultado, há que se concordar com NOGAMI & VILLIBOR (1993), que advertem que essas classificações tendem a atribuir aos solos lateríticos comportamento inferior ao que realmente alcançam quando no estado compactado;
- c) a classificação MCT revela melhoria de comportamento para os solos cuja porcentagem de fração fina limita-se a 20 %;

d) há uma tendência de melhoria de comportamento dos solos, segundo as classificações tradicionais, quando a porcentagem de fração fina limita-se a 40 %; isto pode ser explicado em razão de essas classificações conferirem aos solos de granulometria mais grossa um melhor desempenho.

Com base nas considerações apresentadas, pode-se notar que a classificação MCT foi bem elaborada, não apenas por conferir melhor qualidade aos solos lateríticos e pior qualidade aos não lateríticos, mas também por apresentar uma ordem de preferência qualitativa para emprego dos materiais, reconhecendo as diferenças de qualidade também entre diferentes classes de solos lateríticos e de solos não lateríticos.

Comparando-se os sistemas de classificação HRB e USCS, observa-se que estes foram elaborados de modo coerente ao conferirem melhores características aos solos de granulometria mais grossa em comparação com os solos mais finos. Nota-se que o sistema de classificação HRB é mais deficiente que o USCS, uma vez que a HRB apresenta apenas duas faixas de qualificação (excelente a bom e fraco a pobre) para sete classes de solos, enquanto a USCS apresenta mais de duas qualificações adjetivas para as classes dos solos.

Analisando-se o exposto acima pode-se notar que a classificação MCT foi bem sucedida na medida que conferiu aos solos lateríticos um comportamento melhor do que aos solos não lateríticos, e porque a ordem de preferência proposta pelo método permite criar uma certa hierarquia entre as classes dos solos. As classificações tradicionais tiveram bom êxito quando conferiram aos solos mais grossos um comportamento melhor do que aos solos mais finos; no entanto, dentro das classes dos solos mais grossos e mais finos não obtiveram grande mérito, por não distiguirem um comportamento hierarquizado. É razoável admitir que muitas das discrepâncias citadas na bibliografia especializada entre os sistemas de

classificação tradicionais e o MCT possam ser consequência também da limitada gama de classificação qualitativa dos sistemas tradicionais.

5.7. ENSAIO DE ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO

5.7.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A execução do programa de montagem de solos artificiais deu-se em função da escolha de três tipos de frações finas, das quais já se conhecia, a priori, a atividade e sua localização no ábaco de atividade proposto por FABBRI (1994).

Sabe-se que o valor de azul (V_a) está intimamente ligado à quantidade de argila presente no solo e que é a fração argila (partículas com diâmetros inferiores a 0,005 mm) que comanda a atividade dos solos; portanto, é de se esperar que exista alguma relação entre o valor de azul de metileno de um solo e suas propriedades tecnológicas.

Objetivando explorar melhor o conhecimento da variação das propriedades tecnológicas dos solos em função do tipo e do teor de fração fina presente, estudou-se a relação entre essas propriedades e o valor de azul. Dessa forma, são feitas a apresentação e a análise dos dados através de gráficos em que se representam, em abscissas, o valor de azul, e em ordenadas o valor da propriedade a ser estudada. As propriedades analisadas são: umidade ótima, massa específica aparente seca máxima, mini-CBR na umidade de moldagem, mini-CBR após 24 h de imersão, expansão, contração e relação entre índices de suporte.

A tabela 5.9 mostra as equações de regressão e os coeficientes de correlação obtidos para cada uma das propriedades nas energias de compactação normal e intermediária.

A análise gráfica apresentada nos itens seguintes foi feita apenas para energia de compactação normal, visto que quase sempre o comportamento para as duas energias (normal e intermediária) foram semelhantes. No caso de não o terem sido, mencionam-se os resultados obtidos para energia de compactação intermediária, para efeito de análise e comparação.

Relações entre as variáveis estudadas foram identificadas mediante uso da técnica de regressão, obtendo-se equações que podem ser usadas para estimar os valores das propriedades, conhecidos os valores de azul.

Sabe-se da Estatística que os valores de um experimento nem sempre são bem aproximadas por uma equação linear, de sorte que, quando os dados não podem ser aproximados por um modelo linear, as alternativas são procurar um modelo não-linear (STEVENSON, 1981).

Os diversos valores obtidos foram expressos na forma de pontos locados em um sistema de coordenadas cartesianas, com o objetivo de analisar o diagrama de dispersão e determinar o tipo de curva que mais se ajustava a tais valores. Quando identificou-se relação linear entre as variáveis X e Y a curva de ajuste foi uma reta. Quando o diagrama de dispersão do logaritmo de Y em função de X apresentava uma relação linear, a curva de ajuste resultou uma exponencial. Quando o diagrama de dispersão do logaritmo de Y em função do logaritmo de X apresentava uma relação linear, ajustaram-se os dados por uma curva logarítmica. Assim, entre os três tipos de relação (linear, exponencial e logarítmica), foi sempre escolhida aquela que apresentava o maior valor para o coeficiente de correlação.

TABELA 5.9 - Resultados da análise de regressão de algumas propriedades em função do valor de azul, para as energias de compactação normal e intermediária.

PROPRIEDADES	Energia Normal			Energia Intermediária		
	Descalvado	Castelo Branco	Ribeirão Bonito	Descalvado	Castelo Branco	Ribeirão Bonito
umidade ótima (%)	$Y = 6,30 X + 4,88$ ($r^2 = 0,99$)	$Y = 3,53 X + 2,61$ ($r^2 = 0,96$)	$Y = 0,46 X + 5,64$ ($r^2 = 0,99$)	$Y = 5,69 X + 4,20$ ($r^2 = 0,98$)	$Y = 3,14 X + 3,25$ ($r^2 = 0,97$)	$Y = 0,40 X + 5,09$ ($r^2 = 0,99$)
massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	$Y = -0,18 X + 2,14$ ($r^2 = 0,99$)	$Y = -0,12 X + 2,14$ ($r^2 = 0,99$)	$Y = -0,01 X + 2,12$ ($r^2 = 0,98$)	$Y = -0,17 X + 2,21$ ($r^2 = 0,99$)	$Y = -0,11 X + 2,18$ ($r^2 = 0,98$)	$Y = -0,01 X + 2,22$ ($r^2 = 0,99$)
mini-CBR na umidade de moldagem (%)	$Y = 23,20 X^{-0,33}$ ($r^2 = 0,72$)	$Y = -2,64 X + 27,84$ ($r^2 = 0,99$)	$Y = 131,20 X^{-0,58}$ ($r^2 = 0,96$)	$Y = 156,87 X^{-0,30}$ ($r^2 = 0,72$)	$Y = -2,51 X + 33,18$ ($r^2 = 0,99$)	$Y = 248,35 X^{-0,51}$ ($r^2 = 0,96$)
mini-CBR após 24 h de imersão (%)	$Y = 19,30 X^{-0,37}$ ($r^2 = 0,67$)	$Y = 10,66 \cdot 0,89^X$ ($r^2 = 0,98$)	$Y = 141,19 X^{-0,74}$ ($r^2 = 0,97$)	$Y = 115,12 X^{-0,29}$ ($r^2 = 0,70$)	$Y = 19,83 \cdot 0,99^X$ ($r^2 = 0,91$)	$Y = 250,89 X^{-0,73}$ ($r^2 = 0,95$)
expansão (%)	$Y = -0,002 X + 0,04$ ($r^2 = 0,004$)	$Y = 0,52 X - 0,22$ ($r^2 = 0,93$)	$Y = 0,0001 X^{2,46}$ ($r^2 = 0,97$)	$Y = 0,04 X - 0,01$ ($r^2 = 0,96$)	$Y = 0,66 X - 0,54$ ($r^2 = 0,90$)	$Y = 0,00015 X^{2,31}$ ($r^2 = 0,91$)
contração (%)	$Y = 0,43 X - 0,18$ ($r^2 = 0,99$)	$Y = 0,12 X^{0,83}$ ($r^2 = 0,99$)	$Y = 0,004 X^{1,63}$ ($r^2 = 0,99$)	$Y = 0,19 X + 0,08$ ($r^2 = 0,93$)	$Y = 0,02 X^{0,82}$ ($r^2 = 0,98$)	$Y = 0,015 X^{1,03}$ ($r^2 = 0,98$)
relação entre índices de	$Y = 83,22 X^{-0,03}$	$Y = 32,71 \times 1,06^X$	$Y = 107,61 X^{-0,16}$	$Y = 73,39 X^{-0,02}$	$Y = 54,46 \times 0,99^X$	$Y = 101,02 X^{-0,21}$

5.7.2. UMIDADE ÓTIMA × VALOR DE AZUL

A figura 5.15 mostra a relação entre a umidade ótima e o valor de azul e também as equações que descrevem essas relações, obtidas da análise de regressão para os solos de Descalvado, Castelo Branco e Ribeirão Bonito.

Note-se que a umidade ótima mostra tendência de variar linearmente com o aumento de V_a para os solos estudados, resultando coeficientes de correlação de 0,99, 0,96 e 0,99 (aproximadamente 99 % e 96 % do valor da umidade ótima está relacionada com a variação do valor de azul) para os solos de Descalvado, Castelo Branco e Ribeirão Bonito, respectivamente. A partir das equações fornecidas pode-se estimar, no universo em estudo, o valor da umidade ótima quando se conhece o valor de azul.

FIGURA 5.15 - Relação entre a umidade ótima e o valor de azul para os solos estudados.

5.7.3. MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA MÁXIMA × VALOR DE AZUL

A relação entre a massa específica aparente seca máxima e o valor de azul para os solos estudados está mostrada na figura 5.16.

FIGURA 5.16 - Relação entre a massa específica aparente seca máxima e o valor de azul para os solos estudados.

A partir da análise dessa figura pode-se observar que há uma tendência de essa propriedade variar linearmente com o valor de azul, resultando coeficientes de correlação de 0,99 para os solos de Descalvado e Castelo Branco (aproximadamente 99 % do valor da massa específica aparente

seca máxima está relacionada com a variação do valor de azul) e 0,98 para o solo de Ribeirão Bonito (aproximadamente 98 % do valor da massa específica aparente seca máxima está relacionada com a variação do valor de azul).

A partir das equações fornecidas pode-se inferir, no universo em estudo, que a massa específica aparente seca máxima varia com o valor de azul de acordo com as equações de regressão fornecidas.

5.7.4. MINI-CBR NA UMIDADE DE MOLDAGEM $\times$ VALOR DE AZUL

A variação do valor de mini-CBR na umidade de moldagem em função do valor de azul está apresentada na figura 5.17. Nessa figura estão mostradas também as equações que descrevem a relação entre essas duas variáveis, para cada uma das amostras estudadas.

A figura 5.17 mostra que há uma tendência de o valor de mini-CBR decrescer com o aumento do valor de V_a . Observe-se que existe uma relação linear entre o logaritmo do mini-CBR na umidade de moldagem e o logaritmo do valor de azul, para o caso dos solos de Descalvado e Ribeirão Bonito, com coeficiente de correlação de 0,72 e 0,96, respectivamente, indicando que aproximadamente 72 % e 96 % do mini-CBR na umidade de moldagem está relacionado com a variação do valor de azul. Para o caso do solo da Castelo Branco verifica-se uma relação linear entre mini-CBR na umidade de moldagem e valor de azul, com coeficiente de correlação de 0,99, indicando que aproximadamente 99 % daquela propriedade está relacionada com a variação do valor de azul.

Note-se que as equações fornecidas pela análise de regressão permitem avaliar o valor do mini-CBR na umidade de moldagem em função do valor de azul, e em consequência, da quantidade de argila presente no solo.

FIGURA 5.17 - Relação entre o mini-CBR na umidade de moldagem e o valor de azul para os solos estudados.

5.7.5. MINI-CBR APÓS 24 h DE IMERSÃO × VALOR DE AZUL

A figura 5.18 mostra a relação entre o mini-CBR após 24 h de imersão e o valor de azul, bem como as equações que descrevem essas relações, obtidas da análise de regressão para os solos ensaiados.

Note-se que, para os solos estudados, o valor do mini-CBR mostra tendência de decrescer com o aumento do valor de azul, resultando coeficientes de correlação de 0,67, 0,98 e 0,97 para os solos de Descalvado, Castelo Branco e Ribeirão Bonito, respectivamente.

A partir das equações fornecidas pode-se estimar, no universo em estudo, o valor do mini-CBR após 24 h de imersão quando se conhece o valor de azul.

FIGURA 5.18 - Relação entre o mini-CBR imerso após 24 h de imersão e o valor de azul para os solos estudados.

5.7.6. EXPANSÃO × VALOR DE AZUL

A relação entre a expansão e o valor de azul para os solos estudados está mostrada na figura 5.19.

A partir da análise dessa figura pode-se observar que a expansão aumenta com o valor de azul, resultando coeficientes de correlação de 0,004, 0,93 e

0,97, para os solos de Descalvado, Castelo Branco e Ribeirão Bonito, respectivamente.

Note-se que para o caso do solo de Descalvado praticamente não existe relação entre a expansão e o valor de azul. Isso pode ser aparentemente explicado devido a imprecisão de ensaio na determinação do valor da expansão para o solo D 40 %. Para confirmar essa aparente falta de relação, investigou-se o comportamento do solo na energia intermediária (ver tabela 5.6), verificando-se que existe uma relação linear, com coeficiente de correlação de 0,96.

FIGURA 5.19 - Relação entre a expansão e o valor de azul para os solos estudados.

Esta verificação pode ser interpretada como normal, uma vez que as relações obtidas é função dos resultado de ensaio laboratorial, que consiste, em última análise, em leitura de resultados e cálculo de parâmetros, elementos cuja qualidade pode sempre ser afetada por imprecisões que caracterizam todo trabalho experimental

5.7.7. CONTRAÇÃO × VALOR DE AZUL

A relação entre a contração e o valor de azul para os solos de Descalvado, Castelo Branco e Ribeirão Bonito está mostrada na figura 5.20.

FIGURA 5.20 - Relação entre a contração e o valor de azul para os solos estudados.

A partir da análise dessa figura pode-se observar que a contração aumenta com o valor de azul. A relação mostra coeficientes de correlação de 0,99 para os solos de Descalvado, Castelo Branco e Ribeirão Bonito (apenas 1 % da variação da contração dos solos estudados não pode ser explicada pelo valor de azul).

5.7.8. RELAÇÃO ENTRE ÍNDICES DE SUPORTE $\times$ VALOR DE AZUL

A variação da relação entre índices de suporte (RIS) com o valor de azul está apresentada na figura 5.21. Nessa figura estão descritas, também, as equações que descrevem a relação entre essas duas variáveis, para cada uma das amostras estudadas.

FIGURA 5.21 - Relação entre a relação entre índices de suporte e o valor de azul para os solos estudados.

Para o caso particular da RIS pode-se inferir que não houve uma concordância de relação com o valor de azul, já que não foram obtidos coeficientes de correlação que indicassem um bom relacionamento entre as variáveis analisadas. Os resultados da energia intermediária mostraram coeficientes de correlação de 0,06, 0,61 e 0,76, para os solos de Descalvado, Castelo Branco Ribeirão Bonito, respectivamente.

5.7.9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando-se o aspecto das curvas de ajuste das figuras de 5.15 a 5.21, percebe-se que, exceção feita às propriedades umidade ótima e massa específica aparente seca máxima (que apresentaram ajuste linear entre os valores da propriedade estudada e o valor de azul, para os três tipos de fração fina), a maioria das propriedades apresentaram curvas de ajuste diferentes (por exemplo, os valores de mini-CBR na umidade de moldagem em função do valor de azul foram ajustados por uma reta, no caso do solo da Castelo Branco, e por curvas logarítmicas para os solos de Descalvado e Ribeirão Bonito). Esta verificação pode ser interpretada como normal e expectável, uma vez que os três tipos de fração fina estudados possuem características diferentes; é natural, então, que os valores das propriedades em função do valor de azul de cada solo sejam ajustados por curvas de aspecto diferentes.

Note-se ainda que, mesmo que as propriedades tecnológicas estudadas apresentem comportamento semelhante em função da variação do valor de azul e da porcentagem de fração fina, no sentido de que se determinada propriedade estudada for diretamente proporcional ao valor de azul, também o será à porcentagem de fração fina, existe conveniência em representar a variação dessas propriedades em função do valor de azul. Isto porque, ao se considerar valor de azul como variável independente, resultam curvas

tais que as retas que lhes são tangentes têm coeficientes angulares notadamente diferentes, cada qual associado a um tipo diferente de solo. Quando se considera porcentagem de fração fina como variável independente, nota-se que para diferentes tipos de solos, os coeficientes angulares das retas tangentes às curvas obtidas são praticamente semelhantes.

Na figura 5.22, em que as curvas de variação da umidade ótima em função do valor de azul e em função da porcentagem de fração fina são representadas por linhas mais finas na cor vermelha e por linhas mais grossas na cor azul, respectivamente, ilustram-se as considerações acima expostas.

5.8. DIFRATOMETRIA DE RAIOS X PELO MÉTODO DO PÓ

Os difratogramas de raios X, obtidos dos ensaios de raios X para as três matrizes de frações finas e para fração grossa, encontram-se apresentados no anexo III. A partir da análise desses difratogramas pode-se observar que:

- a) os solos de Descalvado apresentam como principais minerais: caulinita, gibsitita, goetita e quartzo;
- b) os solos da Castelo Branco apresentam como principais minerais: illita, caulinita e quartzo;
- c) os solos de Ribeirão Bonito apresentam como principais minerais: montmorilonita, caulinita e quartzo;
- d) A areia selecionada é composta basicamente pelo mineral de quartzo.

5.9. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

As fotografias obtidas no microscópio eletrônico de varredura para as frações finas de Descalvado, Castelo Branco e Ribeirão Bonito, são apresentadas no anexo IV.

A partir da análise dessas fotografias pode-se observar que:

- a) a fração fina do solo de Descalvado tem aparência de solo laterítico, o que vem confirmar a baixa atividade desse material obtida pelo ensaio de adsorção de azul de metileno;
- b) na fração fina do solo da Castelo Branco, identifica-se empacotamento de caulinita não laterizada perfeitamente hexagonal; o que é próprio de solo com coeficiente de atividade ativo;

- b) na fração fina do solo de Ribeirão Bonito nota-se presença de montmorilonita. A presença de argilo-minerais do grupo das montmorilonitas foi também confirmada através do ensaio de adsorção de azul de metileno, que forneceu coeficiente de atividade muito ativo para essa fração fina.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas do estudo do comportamento dos solos artificiais, fundamentadas na análise dos parâmetros resultantes de ensaios laboratoriais.

Todas as conclusões estão vinculadas ao universo em estudo e, a partir delas, pode-se ter idéia da influência exercida pelo teor e pelo tipo de fração fina sobre as características dos solos.

Observou-se que a variação das propriedades para cada tipo de solo estudado parece estar relacionada às características granulométricas do tipo de fração fina e ao consumo do corante azul de metileno.

6.2 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

6.2.1 QUANTO À CLASSIFICAÇÃO MCT

- a. O índice c' nem sempre traduziu a argilosidade dos solos, pois para a maioria dos casos o seu valor não foi diretamente proporcional à quantidade de argila presente nas misturas.

- b. Amostras provenientes de uma mesma fração argilosa não apresentaram valor constante para o índice e' , conforme o esperado.
- c. A classificação MCT não se mostrou apta a classificar o solo CB 20 %, em razão da impossibilidade da determinação do valor de seu coeficiente P_i .
- d. Para alguns solos ensaiados, não se verificou concordância entre os valores das propriedades obtidas em laboratório e os previstos no ábaco de classificação dos solos de cada classe MCT.

6.2.2. QUANTO À VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DOS SOLOS EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO TEOR E DO TIPO DE FRAÇÃO FINA

- a. A umidade ótima cresceu com o aumento do teor de fração fina e forneceu valores maiores para energia de compactação normal. Para ambas as energias, os maiores valores de umidade ótima foram observados para os solos de Ribeirão Bonito; os solos de Descalvado apresentaram valores intermediários e os da Castelo Branco, os menores valores.
- b. A massa específica aparente seca máxima diminuiu com o aumento do teor de finos e foi sempre maior para energia de compactação intermediária, fornecendo valores maiores, nas duas energias, para os solos de Descalvado.
- c. O valor de mini-CBR na umidade de moldagem mostrou uma tendência de decrescer com o aumento da porcentagem de finos e de ser maior para energia de compactação intermediária; os maiores valores dessa grandeza foram apresentados pelos solos de Descalvado, os solos de

Ribeirão Bonito apresentando valores intermediários e os da Castelo Branco, os valores mais baixos. Esses resultados referem-se à energia de compactação intermediária; para a energia normal, não se pôde identificar um comportamento regular, o que pode ser creditado a imprecisões decorrentes da execução dos ensaios.

- d. O valor de mini-CBR após 24 h de imersão apresentou tendência de decrescer com o aumento do teor de finos, e de ser maior na energia de compactação intermediária. Os solos de Descalvado apresentaram, para as duas energias de compactação, valores maiores de mini-CBR após 24 h de imersão; os de Ribeirão Bonito, valores intermediários e os da Castelo Branco valores inferiores aos verificados para os demais.
- e. A expansão apresentou tendência de crescer com o aumento do teor de finos e com o acréscimo de energia de compactação. Observaram-se valores menores dessa grandeza para os solos de Descalvado, e maiores para os solos da Castelo Branco, com os de Ribeirão Bonito apresentando valores intermediários. Estes resultados referem-se à energia de compactação normal; para energia intermediária, pode-se afirmar que valores menores foram obtidos para os solos de Descalvado, não havendo definição quanto aos valores relativos entre os solos das outras duas matrizes finas.
- f. A contração apresentou tendência de crescer com o aumento do teor de finos; para os solos de Descalvado e Ribeirão Bonito, a contração foi maior para energia de compactação normal e para os solos da Castelo Branco forneceu valores maiores na energia intermediária. Para as duas energias, as maiores magnitudes foram obtidas para os solos de Ribeirão Bonito, as menores para os da Castelo Branco, e os solos de Descalvado apresentaram valores intermediários.

- g. A relação entre índices de suporte não manifestou tendência de comportamento regular, nem quanto ao aumento do teor de finos, nem quanto à energia de compactação.

6.2.3. QUANTO À RELAÇÃO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DOS SOLOS EM FUNÇÃO DO VALOR DE AZUL

- a. A umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima mostraram tendência em variar linearmente com o aumento do valor de azul, esta de modo decrescente, aquela de modo crescente. As relações obtidas através da análise de regressão permitem estimar o valor dessas propriedades quando conhecido o valor de azul (V_a).
- b. Houve uma tendência de os valores de mini-CBR na umidade de moldagem e de mini-CBR após 24 h de imersão decrescerem com o aumento do valor de azul. As relações mostraram que existem boas correlações entre essas propriedades e o valor de azul; assim, conhecendo-se o valor de azul, podem-se estimar os valores daquelas propriedades.
- c. A expansão e a contração apresentaram tendência em crescer com o aumento do valor de azul, existindo relações que permitem predizer seus valores em função do valor de azul.
- d. As equações fornecidas pela análise de regressão para a relação entre índices de suporte não mostraram coeficientes de correlação bons, o que permite inferir ausência de regularidade para a relação entre a RIS e o valor de azul.

6.3. SUGESTÃO PARA AVALIAÇÃO PRELIMINAR DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DOS SOLOS

O estudo desenvolvido neste trabalho gerou uma maneira de avaliar, de modo preliminar, as propriedades dos solos quando se conhecem o coeficiente de atividade da fração fina e seu valor de azul.

Sugere-se que as etapas dessa avaliação preliminar sejam desenvolvidas conforme a seqüência:

- a. execução do ensaio de azul de metileno, seguido de determinação do coeficiente de atividade do solo e do valor de azul (Va);
- b. em função da atividade identificada (se pouco ativo, ativo ou muito ativo), utilizam-se as equações fornecidas pela análise de regressão para os solos de Descalvado (pouco ativo), Castelo Branco (ativo) e Ribeirão Bonito (muito ativo), respectivamente, estimando-se, dessa forma, os valores para um subconjunto qualquer do conjunto das propriedades seguintes: umidade ótima, massa específica aparente seca máxima, mini-CBR na umidade de moldagem, mini-CBR após 24 h de imersão, expansão, contração e relação entre índices de suporte; para tanto, basta identificar, para o solo de mesma classe de atividade, a equação de regressão cuja variável independente é o valor de azul do solo e a variável dependente o valor da propriedade de interesse.

6.4 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os resultados da pesquisa desenvolvida neste trabalho fundamentam-se na composição de quinze amostras de solo, cada uma composta com três diferentes matrizes finas (pouco ativa, ativa e muito ativa) e uma única

matriz grossa. Assim, sugere-se que se possam realizar estudos que difiram do atual quanto aos aspectos seguintes:

- a. variação do tipo de fração grossa, com o objetivo de estudar o comportamento de diferentes materiais grossos, variando-se sua natureza e distribuição granulométrica;
- b. investigação do comportamento dos solos para teores de fração fina não estudados (por exemplo, 10 %, 30 % e 70 %), objetivando verificar se permanece uma tendência de regularidade do comportamento revelado na presente pesquisa; e
- c. execução de ensaios com solos naturais, com o objetivo de verificar se os comportamentos identificados com o estudo de solos artificiais são válidos quando aplicados a solos naturais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Annual book of ASTM standards*. Section 4: Construction, v. 04.08: Soil and rock; dimension stone; geosynthetics. Philadelphia, 1990.

AUTRET, P.; LAN, T. N. Application de l'essai au bleu de méthylène aux graveleux latéritiques. *Revue Générales des Routes et des Aérodrômes*, 586, p. 19-27. Paris, mai 1983.

BOURGUET, J.-L., BROQUET, P., ROUSSEAU, J. Essai de classification de sols pour les terrassements. *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, n.31, p. 25-33, 1985.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. *Mecânica dos solos*. v.1. São Carlos, EESC, 1984.

CASAGRANDE, A. Classification and identification of soils. In: ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. *Proceedings*. p. 783-810. [s.l.], july, 1947.

CASANOVA, F. J. O ensaio de azul de metileno na caracterização de solos lateríticos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 21. *Anais*. (2) p. 276-286. Salvador, 1986.

CHEN, T. J.; SANTOS, P. S.; FERREIRA, H. C.; CALIL, S. F.; ZANDONADI, A. R.; CAMPOS, L. V. Determinação da capacidade de troca de cátions e da área específica de algumas argilas e caulins cerâmicos brasileiros pelo azul de metileno e sua correlação com algumas propriedades tecnológicas. *Cerâmica*, v.20, n.79. p. 305-326. São Paulo, julho/setembro, 1974.

- COZZOLINO, V. M. N.; NOGAMI, J. S. Classificação geotécnica MCT para solos tropicais. *Solos e Rochas*, São Paulo, v.2, n.16, p. 77-91, ago., 1993.
- DENIS, A.; TOURENQ, C.; LAN, T. L. Capacité d'adsorption d'eau des sols et des roches. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. n.22, p. 201-205. Krefeld, 1980.
- DER-SP - Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. *Manual de normas: pavimentação*. São Paulo, DER-SP, 1991.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Métodos de ensaios*. Rio de Janeiro, DNER, 1968.
- DUMBLETON, M. J. The British soil classification for engineering purposes: its development and relation to other comparable systems. *TRRL Laboratory Report 1030*. Crowthorne, Transport and Road Research Laboratory, 1981.
- FABBRI, G. T. P. *Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno*. São Carlos, 1994. (Tese de Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- FABBRI, G. T. P.; SÓRIA, M. H. A. Aplicação do ensaio de azul de metileno à classificação de solos - uma primeira aproximação. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 25. *Anais*. (1) p. 381-399. São Paulo, 1991.
- FABBRI, G. T. P.; SÓRIA, M. H. A. Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 28. *Anais*. (1) p. 157-183. Belo Horizonte, 1994.
- FERREIRA, A. B. H. *Novo dicionário da língua portuguesa*. São Paulo, Novo Horizonte, 1975.

- HANG, P. T.; BRINDLEY, G. W. Methylene blue adsorption by clay minerals. Determination of surface areas and cation exchange capacities (clay-organic studies XVIII). *Clays and Clay Minerals*, v. 18, p. 203-212, [s.l.], 1970.
- HIGGS, N. B. Methylene blue adsorption as a rapid and economical method of detecting smectite. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, v.11, n.1. p 68-71. Philadelphia, march 1988.
- KERGOET, M.; CIMPELLI, C. Appréciation d'un comportement de sable fin pollué par l'essai au bleu de méthylène. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*. N.º 108, p. 89-90 [s.l.], juil-aôut, 1980.
- LABORATOIRE CENTRAL DES PONTES ET CHAUSSEES. *L'essai au bleu de méthylène: avant-projet de mode opératoire*. [s.l. : s. n.], 1979.
- LAN, T. N. Un nouvel essai d'identification des sols - l'essai au bleu de méthylène. *Bulletin de Liasion des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n.88, p. 136-137, mars/avr., 1977.
- LAN, T. N. L'essai au bleu de méthilène: un progrès dans la mesure et le contrôle de la propreté des granulats. *Bulletin de Liasion des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n. 107, p. 130-135, mai/juin, 1980.
- LAN, T. N. Utilisation de l'essai au bleu de méthylène en terrassement routier. *Bulletin de Liasion des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n.111, p. 5-16, jan./fév., 1981.
- LAUTRIN, D. Une procédure rapide d'identification des argiles. *Bulletin de Liasion des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n.152, p.75-84, nov./dec., 1987.

- MAGNAN, J.; YOUSSEFIAN, G. Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, v.159, p. 93-104, jan./fév., 1989.
- MEDINA, J.; PREUSSLER, E. S. Características resilientes de solos em estudos de pavimentos. *Solos e Rochas*, v.3, n.1, p. 3-26. Rio de Janeiro, ABMS, 1980.
- MERCK & Co. *The Merck index of chemical and drugs*. Rahway, Merck & Co., Inco., 1952.
- MORA, M. R. *Análise crítica das classificações de solos para fins rodoviários usadas no Brasil. Proposta e adequação para a região metropolitana da Grande São Paulo*. São Carlos, 1993. (Dissertação de Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- NOGAMI, J. S. *Metodologia MCT e suas aplicações em obras viárias - PTR-786 - Notas de aula*. São Paulo, EPUSP, 1992.
- NOGAMI, J. S. et alli. Pavimentação com solos lateríticos. In: SOLOS DO INTERIOR DE SÃO PAULO,. *Anais*. p.315-335. São Carlos, 1993.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Caracterização e classificação gerais de solos para pavimentação: limitações do método tradicional, apresentação de uma nova sistemática. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 15. Belo Horizonte, 1980. *Separata*.
- NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA. Rio de Janeiro, 1981. *Separata*.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Os solos tropicais lateríticos e a pavimentação. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 18. *Anais*. Porto Alegre, 1983.

- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Additional considerations about a new geotechnical classification for tropical soils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOILS, 1, *Proceedings*. p.165-174. Brasilia, 1985.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Nova metodologia (MCT) de estudos geotécnicos e suas aplicações em rodovias vicinais. I SENAVI, *Anais*. São Paulo, 1988.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. São Paulo, Vilibor, 1995.
- PEJON, O. J. *Mapeamento geotécnico regional da folha de Piracicaba - SP (escala 1:100.000): estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos*. São Carlos, 1992. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SCHAEFFNER, M. Introduction de la valeur de bleu de méthylène d'un sol dans la classification des sols de la recommandation pour les terrassements routiers. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, v.163, p. 9-16, sept./oct., 1989.
- SCHON, C. Classification géotechnique des sols basée sur la classification U.S.C.S. . *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 16. nov./dez., p.3-5 - 3-16. [s.l.], 1965.
- SEED, H. B.; WOODWARD, R. J.; LUNDGREN, R. Clay mineralogical aspects of the Atterberg limits. In: ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. *Proceedings*. p. 107-131. [s.l.], july, 1964.

SÓRIA, M. H. A. *Relatório técnico de apreciação de programa desenvolvido dentro do convênio DER-IPAI 44/77 - "Estudo comparativo das características geotécnicas de solo laterítico e solo residual saprolítico a partir de solos montados em laboratório em função da granulometria".* São Carlos, 1977.

SÓRIA, M. H. A. *Reflexões lógicas sobre classificação de solos.* São Carlos, 1985. (Tese de Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

STEELE, D. J. Application of the classifications and group index in estimating desirable subbase and total pavement thickness. *Proceedings of the Highway Research Board*, p. 388-392. [s.l.], HRB, 1945.

STEVENSON, W. J. *Estatística aplicada à administração.* São Paulo, Harper & Row, 1981.

VARGAS, M. *Introdução à mecânica dos solos.* São Paulo, McGraw-Hill / Universidade de São Paulo, 1977.

VERTAMATTI, E. Novas considerações geotécnicas sobre solos tropicais amazônicos de textura fina. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 23. *Anais*, p. 533-564. Florianópolis, 1988.

VILLIBOR, D. F. *Pavimentos econômicos. Novas considerações.* São Carlos, 1981. (Tese de Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ANEXO I

**Resultados dos Ensaio de Mini-CBR, Expansão e Contração na
Energia Normal, para os Solos Compostos de Descalvado,
Ribeirão Bonito e Castelo Branco.**

Solos Compostos de Descalvado**Amostra : Descalvado (D 20 %)**

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Retração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
7,28	1,835	0,02	0,18	24,9	11,5
8,72	1,912	0,00	0,14	30,0	27,7
9,70	1,962	0,00	0,10	31,4	28,5
10,88	1,995	0,00	0,10	27,1	19,8
11,91	1,975	0,00	0,28	20,5	18,1
12,28	1,947	0,00	0,20	13,0	19,8

Amostra : Descalvado (D 40 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Retração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
10,13	1,577	0,10	0,31	34,3	4,1
11,88	1,690	0,08	0,28	27,1	10,1
13,27	1,806	0,08	0,34	23,5	17,2
14,61	1,863	0,12	0,50	21,2	15,8
15,59	1,856	0,12	0,94	16,8	11,5
16,30	1,837	0,00	0,65	10,7	9,3
17,51	1,781	0,00	1,30	6,0	5,0

Amostra : Descalvado (D 60 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Retração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
15,05	1,402	0,48	0,41	23,9	4,1
16,96	1,499	0,06	0,53	20,5	7,6
18,89	1,624	0,04	0,73	19,0	10,1
20,83	1,660	0,00	1,07	14,2	11,8
22,51	1,626	0,00	2,30	7,6	5,2

Amostra : Descalvado (D 80 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Retração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
19,41	1,285	2,19	0,38	22,7	4,1
22,08	1,399	1,55	0,63	18,1	6,7
24,63	1,511	0,02	1,53	16,0	13,8
28,10	1,488	0,06	2,13	10,1	5,9
30,60	1,442	0,00	2,80	4,1	3,2

Amostra : Descalvado (D 100 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Retração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
23,53	1,175	0,66	0,18	33,6	3,2
27,44	1,291	0,43	0,63	26,1	8,5
31,23	1,430	0,04	1,49	17,3	14,5
34,86	1,357	0,08	1,62	6,8	7,6
38,21	1,306	0,00	1,70	3,6	3,2

AMOSTRA: Descalvado (D 20 %)

FRAÇÃO FINA: 20 %

FRAÇÃO GROSSA: 80 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Normal

AMOSTRA: Descalvado (D 40 %)

FRAÇÃO FINA: 40 %

FRAÇÃO GROSSA: 60 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Normal

AMOSTRA: Descalvado (D 60 %)

FRAÇÃO FINA: 60 %

FRAÇÃO GROSSA: 40 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Normal

AMOSTRA: Descalvado (D 80 %)

FRAÇÃO FINA: 80 %

FRAÇÃO GROSSA: 20 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Normal

AMOSTRA: Descalvado (D 100 %)

FRAÇÃO FINA: 100 %

FRAÇÃO GROSSA: 0 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Normal

Solos Compostos de Ribeirão Bonito

Amostra: Ribeirão Bonito (RB 20 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Retração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
7,68	1,847	0,63	0,26	33,0	8,5
9,54	1,872	0,32	0,24	34,2	12,2
11,42	1,931	0,12	0,20	33,6	17,5
13,34	1,949	0,08	0,28	22,0	15,9
15,16	1,872	0,00	0,33	7,6	5,0

Amostra: Ribeirão Bonito (RB 40 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Retração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
11,50	1,723	3,28	0,60	24,2	5,6
13,39	1,741	1,76	0,65	24,9	10,1
15,39	1,790	0,90	0,78	19,6	12,8
17,23	1,809	0,30	1,03	17,5	10,7
19,21	1,754	0,24	1,03	8,5	6,8

Amostra: Ribeirão Bonito (RB 60 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Retração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
17,44	1,542	6,10	1,01	18,9	5,2
20,52	1,573	3,18	1,16	18,1	7,0
23,17	1,619	1,96	1,46	15,3	6,7
25,97	1,567	0,58	1,38	10,1	6,3
28,45	1,516	0,14	1,79	7,6	5,0

Amostra: Ribeirão Bonito (RB 80 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Retração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
23,67	1,416	5,71	1,87	16,8	3,6
27,18	1,435	2,66	2,27	15,8	5,9
29,85	1,455	1,84	2,97	12,6	7,0
32,38	1,426	1,32	2,43	10,7	6,8
35,14	1,373	1,24	3,15	9,3	4,8

Amostra: Ribeirão Bonito (RB 100 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Retração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
31,17	1,348	4,30	2,80	16,6	4,9
33,33	1,365	3,27	3,07	14,2	5,2
36,22	1,370	2,61	3,99	12,6	6,8
38,56	1,328	2,25	2,57	10,1	6,8
42,31	1,277	1,50	4,40	6,8	5,2

AMOSTRA : Ribeirão Bonito (RB 20 %)

FRAÇÃO FINA: 20 %

FRAÇÃO GROSSA: 80 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Normal

AMOSTRA : Ribeirão Bonito (RB 40 %)

FRAÇÃO FINA: 40 %

FRAÇÃO GROSSA: 60 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Normal

AMOSTRA: Ribeirão Bonito (RB 60 %)

FRAÇÃO FINA: 60 %

FRAÇÃO GROSSA: 40 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Normal

AMOSTRA: Ribeirão Bonito (RB 80 %)

FRAÇÃO FINA: 80 % FRAÇÃO GROSSA: 20 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Normal

AMOSTRA : Ribeirão Bonito (RB 100 %)

FRAÇÃO FINA: 100 %

FRAÇÃO GROSSA: 0 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Normal

Solos Compostos da Castelo Branco

Amostra: Castelo Branco (CB 20 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Retração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
7,26	1,896	0,52	0,16	26,7	6,3
8,81	1,923	0,16	0,12	19,8	7,4
9,50	1,945	0,24	0,16	23,5	8,2
11,60	1,921	0,10	0,18	20,7	12,8
12,95	1,907	0,04	0,42	7,8	7,0

Amostra: Castelo Branco (CB 40 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Retração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
8,06	1,822	2,36	0,08	23,5	5,9
10,39	1,796	1,79	0,28	20,5	8,3
10,96	1,843	1,51	0,27	23,5	5,2
12,09	1,804	1,19	0,42	21,2	7,4
13,71	1,820	0,00	0,45	13,8	9,2
15,86	1,787	1,18	0,63	9,9	9,3

Amostra: Castelo Branco (CB 60 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Retração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
11,27	1,63	4,74	0,16	12,4	3,2
12,90	1,644	3,40	0,18	19,8	5,2
19,65	1,624	1,53	0,67	11,8	6,0
21,56	1,604	1,40	0,92	7,6	5,2
16,71	1,655	2,19	0,36	16,8	6,0
15,40	1,656	2,66	0,33	17,5	4,4

Amostra: Castelo Branco (CB 80 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Retração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
14,03	1,403	4,91	0,22	16,0	3,6
17,13	1,428	3,58	0,28	12,1	3,6
21,01	1,445	3,59	0,44	15,3	3,8
23,67	1,444	2,47	0,66	11,3	5,5
28,89	1,421	2,21	1,32	8,2	5,6
31,59	1,405	2,28	1,17	5,9	2,2

Amostra: Castelo Branco (CB 100 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Retração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
19,62	1,293	3,80	0,14	10,1	
22,86	1,303	5,37	0,41	7,6	2,7
25,91	1,307	3,30	0,51	9,6	4,9
28,64	1,322	3,66	0,59	12,2	4,9
32,33	1,317	2,74	0,78	10,0	4,2

AMOSTRA: Castelo Branco (CB 20 %)

FRAÇÃO FINA: 20 %

FRAÇÃO GROSSA: 80 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO : Normal

AMOSTRA: Castelo Branco (CB 40 %)

FRAÇÃO FINA: 40 %

FRAÇÃO GROSSA: 60 %

ENRGIA DE COMPACTAÇÃO : Normal

AMOSTRA: Castelo Branco (CB 60 %)

FRAÇÃO FINA: 60 %

FRAÇÃO GROSSA: 40 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Normal

AMOSTRA: Castelo Branco (CB 80 %)

FRAÇÃO FINA: 80 % FRAÇÃO GROSSA: 20 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Normal

AMOSTRA: Castelo Branco (CB 100 %)

FRAÇÃO FINA: 100 %

FRACÃO GROSSA: 0 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO : Normal

ANEXO II

**Resultados dos Ensaio de Mini-CBR, Expansão e Contração na
Energia Intermediária, para os Solos Compostos de Descalvado,
Ribeirão Bonito e Castelo Branco.**

Solos Compostos de Descalvado

Amostra: Descalvado (D 20 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Contração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
6,41	1,947	0,00	0,20	72,5	21,8
7,41	1,989	0,04	0,12	71,1	32,3
8,34	2,012	0,06	0,10	68,4	35,1
9,29	2,035	0,04	0,14	62,9	49,4
10,21	2,059	0,04	0,16	61,5	46,4
10,83	2,030	0,00	0,20	28,5	35,0
12,29	1,964	0,00	0,30	9,9	12,2

Amostra: Descalvado (D 40 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Contração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
7,75	1,727	0,83	0,28	110,6	10,1
9,57	1,737	0,60	0,36	110,6	12,2
11,51	1,904	0,06	0,52	84,6	32,9
13,15	1,927	0,02	0,47	40,0	37,1
15,28	1,851	0,00	0,59	16,8	11,5

Amostra: Descalvado (D 60 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Contração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
13,96	1,577	1,05	0,12	90,0	9,3
15,21	1,648	0,22	0,22	83,9	16,6
16,73	1,741	0,20	0,48	63,6	30,1
18,17	1,757	0,00	0,80	30,7	24,2
19,48	1,711	0,06	1,05	14,5	10,1

Amostra: Descalvado (D 80 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Contração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
16,70	1,403	1,40	0,00	67,0	6,0
18,51	1,434	0,93	0,12	67,7	8,5
19,20	1,442	0,63	0,04	66,3	13,4
20,39	1,529	0,42	0,22	71,1	19,1
22,75	1,620	0,06	0,68	43,5	30,8
25,08	1,541	0,00	1,30	14,5	14,5
28,53	1,471	0,00	2,51	5,9	6,8

Amostra: Descalvado (D 100 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Contração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
22,10	1,347	1,30	0,00	82,6	8,5
24,49	1,383	0,00	0,14	58,1	13,8
28,15	1,523	0,14	0,77	37,1	36,4
30,38	1,437	0,00	1,29	18,3	17,3
33,30	1,384	0,00	1,85	13,8	11,0

AMOSTRA: Descalvado (D 20 %)

FRAÇÃO FINA: 20 %

FRAÇÃO GROSSA: 80 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Intermediária

AMOSTRA: Descalvado (D 40 %)

FRAÇÃO FINA: 40 % FRAÇÃO GROSSA: 60 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Intermediária

AMOSTRA: Descalvado (D 60 %)

FRAÇÃO FINA: 60 % FRAÇÃO GROSSA: 40 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Intermediária

AMOSTRA: Descalvado (80 %)

FRAÇÃO FINA: 80 %

FRAÇÃO GROSSA: 20 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Intermediária

AMOSTRA: Descalvado (D 100 %)

FRAÇÃO FINA: 100 %

FRAÇÃO GROSSA: 0 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Intermediária

Solos Compostos de Ribeirão Bonito

Amostra: Ribeirão Bonito (RB 20 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Contração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
7,37	1,975	0,58	0,02	60,9	17,5
8,88	1,995	0,32	0,14	60,2	31,4
10,29	2,032	0,16	0,20	54,2	32,1
11,56	2,031	0,08	0,37	52,6	24,2
13,02	1,973	0,02	0,43	13,0	10,7

Amostra: Ribeirão Bonito (RB 40 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Contração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
8,01	1,847	5,88	0,71	66,3	6,0
11,22	1,886	4,51	0,69	58,8	8,0
13,08	1,915	2,51	0,77	51,2	13,0
14,98	1,924	2,00	0,81	35,7	14,3
16,93	1,840	0,74	0,75	19,8	13,0
18,81	1,763	0,64	0,88	9,6	9,6

Amostra: Ribeirão Bonito (RB 60 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Contração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
16,13	1,712	6,88	0,16	42,8	8,5
18,31	1,716	3,21	0,18	37,8	9,2
20,01	1,719	3,01	0,71	30,7	11,5
22,21	1,670	0,00	1,36	23,5	12,2
24,09	1,615	0,00	1,77	13,8	11,0

Amostra: Ribeirão Bonito (RB 80 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Contração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
23,57	1,548	5,30	0,69	31,4	5,9
25,18	1,549	3,68	1,04	27,1	9,3
27,14	1,541	3,59	1,32	25,7	11,5
29,64	1,486	2,15	2,07	17,5	6,0
31,10	1,442	1,09	2,75	13,4	8,4

Amostra: Ribeirão Bonito (RB 100 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Contração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
26,74	1,387	7,59	1,30	25,7	5,2
28,85	1,404	6,33	1,53	28,5	6,8
30,50	1,412	3,04	1,49	27,1	9,9
32,08	1,408	4,45	1,76	25,6	6,8
34,94	1,383	3,33	1,28	17,3	6,0

AMOSTRA: Ribeirão Bonito (RB 20 %)

FRAÇÃO FINA: 20 %

FRAÇÃO GROSSA: 80 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Intermediária

AMOSTRA: Ribeirão Bonito (RB 40 %)

FRAÇÃO FINA: 40 %

FRAÇÃO GROSSA: 60 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Intermediária

AMOSTRA: Ribeirão Bonito (RB 60 %)

FRAÇÃO FINA: 60 %

FRAÇÃO GROSSA: 40 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Intermediária

AMOSTRA: Ribeirão Bonito (RB 80 %)

FRAÇÃO FINA: 80 %

FRAÇÃO GROSSA: 20 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Intermediária

AMOSTRA: Ribeirão Bonito (RB 100 %)

FRAÇÃO FINA: 100 %

FRAÇÃO GROSSA: 0 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Intermediária

Solos Compostos da Castelo Branco

Amostra: Castelo Branco (CB 20 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Contração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
3,97	1,960	0,64	0,04	36,6	15,0
5,71	1,978	0,54	0,06	30,7	15,8
7,63	1,983	0,00	0,10	40,0	18,5
9,33	1,994	0,14	0,18	28,5	16,8
12,55	1,961	0,08	0,37	9,2	6,8

Amostra: Castelo Branco (CB 40 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Contração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
5,29	1,890	3,88	0,00	45,6	7,6
7,16	1,894	2,72	0,10	37,0	8,4
9,26	1,924	2,54	0,24	29,6	9,2
11,04	1,929	1,52	0,36	40,0	9,9
13,15	1,900	1,38	0,52	19,1	8,0

Amostra: Castelo Branco (CB 60 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Contração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
12,16	1,723	5,03	0,49	35,4	5,2
13,93	1,746	2,93	0,26	22,7	8,4
16,03	1,745	2,65	0,57	24,9	9,2
19,83	1,652	1,87	0,81	10,3	5,9
17,75	1,734	3,20	1,33	11,0	3,5

Amostra: Castelo Branco (CB 80 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Contração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
13,39	1,566	6,08	0,06	27,9	8,0
16,68	1,562	5,53	0,34	26,7	6,3
18,84	1,579	5,21	0,48	26,4	3,6
21,91	1,568	5,77	0,81	19,2	4,4
25,14	1,485	0,91	0,95	11,3	3,6

Amostra: Castelo Branco (CB 100 %)

Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão (%)	Contração (%)	Mini - CBR (Imediato)	Mini - CBR (24 h)
21,32	1,434	4,71	0,38	16,9	4,4
23,38	1,440	5,32	0,53	22,0	6,3
26,22	1,440	3,83	0,63	14,3	5,9
27,74	1,416	3,07	0,77	9,6	5,9
30,90	1,357	3,23	1,04	7,4	4,9

AMOSTRA: Castelo Branco (CB 20 %)

FRAÇÃO FINA: 20 %

FRAÇÃO GROSSA: 80 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Intermediária

AMOSTRA: Castelo Branco (CB 40 %)

FRAÇÃO FINA: 40 % FRAÇÃO GROSSA: 60 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Intermediária

AMOSTRA: Castelo Branco (CB 60 %)

FRAÇÃO FINA: 60 %

FRAÇÃO GROSSA: 40 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Intermediária

AMOSTRA: Castelo Branco (CB 80 %)

FRAÇÃO FINA: 80 % FRAÇÃO GROSSA: 20 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Intermediária

AMOSTRA: Castelo Branco (CB 100 %)

FRAÇÃO FINA: 100 %

FRAÇÃO GROSSA: 0 %

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO: Intermediária

ANEXO III

Difratogramas de Raios X

Difratograma de Raios X para a Fração Fina de Descalvado

Difratograma de Raios X para a Fração Fina da Castelo Branco

Difratograma de Raios X para a Fração Fina de Ribeirão Bonito

Difratograma de Raios X para a Areia Seleccionada

ANEXO IV

Fotografias no Microscópio Eletrônico de Varredura

Amostra: Descalvado

Porcentagem de Argila (%) = 38

Va (10^{-3} g/g) = 2,12

CA (10^{-3} g/g %) = 5,6

Observações: Notar a aparência de solo laterítico.

Aumento de 1.500 x

Aumento de 3.000 x

Amostra: Castelo Branco

Porcentagem de Argila (%) = 13

Va (10^{-3} g/g) = 5,21

CA (10^{-3} g/g %) = 40,1

Observações: Notar o empacotamento de caulinita não laterizada
perfeitamente hexagonal.

Aumento de 1.500 x

Aumento de 3.000 x

Amostra: Ribeirão Bonito

Porcentagem de Argila (%) = 50

Va (10^{-3} g/g) = 50,34

CA (10^{-3} g/g %) = 100,7

Observações: Notar a presença de montmorilonita.

Aumento de 1.500 x

Aumento de 3.000 x